



# Simposio **Fertilidad** 2019

Conocer más.  
Crecer mejor.



**8 y 9 de Mayo**

Rosario, Santa Fe. Argentina.

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

  
**FERTILIZAR**  
ASOCIACION CIVIL

## Conocer mas, crecer mejor

La Asociación Civil FERTILIZAR tiene el agrado de darles la bienvenida al Simposio "Fertilidad 2019: "Conocer mas, crecer mejor". Como en ocasiones anteriores, nos acompañan instituciones y organizaciones afines a las cuales les estamos profundamente agradecidos: la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACS), la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Región Sur de Santa Fe de los grupos CREA, la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario (UNR), la Fundación Producir Conservando, y la Red de Buenas Prácticas Agrícolas (RedBPA).

El Simposio Fertilidad 2019 tiene como objetivo principal presentar y discutir conocimientos e información actualizada en el manejo de los nutrientes para una agricultura sustentable en lo productivo, ambiental y social. Buscamos "Conocer mas" para "crecer mejor". El conocimiento de los procesos y mecanismos de la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-cultivo es esencial en la búsqueda de una agricultura sustentable de alta productividad y cuidadosa del ambiente físico y humano. En ese camino, el conocimiento de la dinámica de nutrientes más la incorporación de nuevas tecnologías de procesos, nos permiten ser mas eficientes y más efectivos en el uso de los nutrientes del suelo y los que eventualmente apliquemos.

- Fertilidad de suelos argentinos: ¿Cómo estamos hoy?
- Conferencia: ¿Como manejamos la fertilización de cultivos en el medio oeste de EE.UU.?
- ¿Qué hay de nuevo en cultivos?
- Aplicando fertilizantes: ¿Lo hacemos bien?
- Agricultura de precisión y el futuro: Hoy y ¿mañana?
- Pensando en sistemas: Rol de la nutrición
- Nutrición para alta productividad y rentabilidad en ambientes saludables

Asimismo, se presentan una serie de posters con resultados relevantes de distintas investigaciones realizadas en los últimos años en la región. Los resúmenes escritos de las presentaciones de los paneles y de los posters se incluyen en esta publicación.

Las dos jornadas de trabajo nos permitirán intercambiar información y experiencias con distinguidos profesionales nacionales y extranjeros que nos presentarán su visión sobre el rol de la nutrición de cultivos en la búsqueda de una agricultura más eficiente y sustentable. Fertilizar A.C. agradece muy especialmente la participación de los disertantes de INTA, Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP), CONICET, Kansas State University (EE.UU.), Grupo Agua y Leche (Uruguay), AAPRESID, Facultad de Agronomía (UNRC), Clarion, Facultad de Agronomía (UBA), Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER), y la actividad privada. También hacemos extensivo este agradecimiento a las empresas que confiaron en el evento y nos brindaron su apoyo.

Rosario, 8 de Mayo de 2019

**Ing. Agr. María Fernanda González Sanjuan**  
Gerente Ejecutivo, Fertilizar A.C  
[mfgonzalez@fertilizar.org.ar](mailto:mfgonzalez@fertilizar.org.ar)

**Dr. Fernando O. García**  
Coordinador Académico  
[fgarcia1957@gmail.com](mailto:fgarcia1957@gmail.com)

Conferencia	Autores	Pag.
Avances en la interpretación de análisis de suelo	Nahuel Reussi Calvo y Nicolás Wyngaard	5
Brechas en la producción de secuencias de cultivos en la región pampeana según estrategias de fertilización	Andrés Grasso	14
Manejo de la fertilización de cultivos en el medio oeste de EE.UU.	Dorivar Ruiz Díaz, Fernando Hansel, Cristie Preston y Andrew Stammer	21
¿Cómo producir más pasto?	Elena Patrón	26
La nutrición del cultivo de trigo	Fernando O. García, Guillermo Divito y Nahuel Reussi Calvo	36
Maíces tempranos, tardíos o de segunda: ¿todos iguales?	Gabriel Espósito, Cecilia Cerliani y Rafael Naville	55
Soja de alto rendimiento: ¿Cómo la nutrimos?	Fernando Salvagiotti	59
Regulación de fertilizadoras: con la dosis no alcanza	Santiago Tourn, Juan Ignacio Santos, Mariano Trueba, Rodrigo Lasaga; Dionisio Martínez y Walter Carciochi	67
Equipamientos de agricultura de precisión en aplicaciones de fertilizantes	Andrés Méndez y Juan Pablo Vélez	73
Llevando la agricultura de precisión al lote	Agustín Pagani	78
Satélites y Agricultura: Satélite Argentino de Observación con Microondas "SAOCOM"	Francisco Damiano	88
El futuro de las tecnologías para el agro	Rodolfo Bongiovanni y James Lowenberg-DeBoer	93
¿Que es intensificar cultivos sustentablemente?	Juan Pablo Monzón	104
Cultivos de servicios y nutrición del sistema: sincronizando los ciclos de los nutrientes	Gervasio Piñeiro, Priscila Pinto y Sebastián Villariño	106
Los nutrientes en el ambiente	María Carolina Sasal, Marcelo G. Wilson, Mariela S. Seehaus, Emmanuel A. Gabioud, Natalia V. Van Opstal, Ana Winge- yer, Stella Beghetto, Jezabel Primost, María Liliana Darder y Adrián E. Andriulo	113
Toma de decisiones en nutrición de cultivos integrada al ambiente edáfico, clima y manejo	Gustavo Ferraris	121
Fertilización foliar: ¿Por qué? ¿Para qué?	Cesar Quintero	131
¿Hay una receta para la fertilización perfecta?	Martin Díaz Zorita	136
Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana	Hernán Sainz Rozas	141

Poster	Autores	Pag.
Capacidad de secuestro de carbono de los suelos pampeanos	Alvarez Roberto y Gonzalo Berhongaray	159
Fraciones orgánicas de fósforo del suelo en el diagnóstico de fertilidad fosfatada	Appelhans Stefania, Pedro Barbagelata, Ricardo Melchiori y Flavio Gutiérrez Boem	164
¿Conviene fertilizar con nitrógeno pasturas alfalfa-festuca mediterránea?	Marino María Alejandra, G. D. Berone, L. Clausen, M. Nuñez Lucanera y G.I. Giacchino	172
Rotación de cultivos y dinámica de nutrientes en suelos de tambos	Berhongaray Gonzalo, Amancay Herrera, Roberto Rotondaro, Florencia Gonzalez, María Sol Hernandez, Santiago Moro y Alejandro Palladino	178
Fertilización NS en trigo pan: Incidencia en las respuestas del peso y la calidad del grano a las condiciones de llenado	Arata Agustín, Deborah P. Rondanini, Gabriela E. Tranquilli, Adriana C. Arrigoni, Gonzalo Pizarro, Emilio A. Moris y Laura Lázaro	186
Validación a campo de los modelos de nutrición nitrogenada para trigo y cebada	Divito G., H. Sainz Rozas, A. Torres, G. Berg, L. Piloni, J. Kitzroser y G. Therisod	195
Diagnóstico de condición nitrogenada y brecha de rendimiento por nitrógeno a tres nudos en trigo	Fassana Nicolas, Esteban Hoffman, Andrés Berger y Oswaldo Ernst	202
Absorción de N y S en cebada: relaciones con rendimiento y proteína	Gomez Federico, José Boero, Pablo Prystupa, Gustavo Ferraris y Flavio Gutiérrez Boem	207
Estrategias de manejo de la nutrición nitrogenada sobre el rendimiento y calidad de trigo pan	Manlla Amalia y Julio Castellarin	212
¿Cuál es el mejor criterio para delinear zonas de manejo de nitrógeno para maíz en el noroeste bonaerense?	Girón Paula, Agustín Pagani y Flavio Gutiérrez Boem	217
Efecto residual en maíz de la inoculación en arveja y vicia	Enrico Juan y Fernando Salvagiotti	227
Manejo de la fertilización nitrogenada en maíz de fecha temprana en el sudeste de Córdoba	Ruiz Alejo, Fernando Salvagiotti y Lucas Borrás	233
Fertilización nitrogenada en fechas de siembra tempranas y tardías de maíz	Pautaso Juan M., Nicolás Maltese y Ricardo M. Melchiori	240
Generación de mapas de prescripción variable de nitrógeno utilizando imágenes de sensores remotos	Melchiori Ricardo, Arturo Melchiori, Susana Albarenque y Alejandra Kemerer	245
Aportes al manejo sustentable del suelo y la nutrición del cultivo de caña de azúcar en Tucumán-Argentina	Romero Juan, Agustín Sanzano y Eduardo Romero	234
Fertilización de eucalyptus utilizando balance nutricional	Stahnger Nicolás, Júlio César Lima Neves y Humberto Carlos Dalurzo	258
Buenas prácticas de manejo de fertilizantes y enmiendas en suelos acidificados de la Región Pampeana	Torres Duggan Martín, Ignacio Alzueta, José Lamelas y Mónica B. Rodríguez	267
¿Cómo nutrir sistemas intensificados? Aprendizajes de la Chacra Bragado-Chivilcoy	Alzueta Ignacio y Martín Torres Duggan	277
Identificación de factores limitantes del rendimiento de una secuencia de cultivos	Etchegoimberly Pilar y Oswaldo Ernst	286
Efecto de los cultivos de servicio sobre la disponibilidad de agua y nitrógeno y el rendimiento en el cultivo de maíz en Santiago del Estero	Prieto Angueira Salvador, María Clara Berton y Javier Ventura	290
Intensificación agrícola: el balance productividad-conservación de propiedades del suelo dependen de la rotación	Ernst Oswaldo, Armén Kernanian, Senastían Mazzilli, Mónica Cadenazzi, Guillermo Siri-Prieto y Santiago Dogliotti	296
Efectos de la reposición de nutrientes sobre los rendimientos en la secuencia maíz-trigo/soja	Gudelj V.J., H. Ghío, O. Gudelj, C. Lorenzon, M.B. Conde, C. Galarza, P. Tamburrini y F. García	304
Red Nutrición Sur Santa Fe: 18 años de ensayos en lotes de producción	Gelso Paula, Franco Permingeat, Ricardo Pozzi, Santiago Gallo, Matías Salinas, Nahuel Reussi Calvo y Fernando O. García	312



# Avances en la interpretación de análisis de suelo

Nicolás Wyngaard<sup>1,2</sup> y Nahuel Reussi Calvo<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, <sup>2</sup> CONICET, <sup>3</sup>FERTILAB,  
wyngaard.nicolas@inta.gob.ar; nreussicalvo@laboratoriofertilab.com.ar

## Introducción

El diagnóstico de la fertilidad de suelos y la recomendación de fertilización de cultivos contemplan diferentes etapas entre las que se destacan: 1- *muestreo de suelo*, 2- *el análisis propiamente dicho* y 3- *la interpretación de los resultados* (Barbazán y García, 2015). La primera de ellas resulta clave, dado que representa el primer paso dentro del proceso que lleva a la recomendación de fertilización. En los últimos años se han observado que los errores en el muestreo de suelos son de 3 a 6 veces superiores a los errores durante el análisis de laboratorio. Por lo tanto, se deberían considerar para una correcta toma de la muestra de suelo: el momento y profundidad de muestreo según el nutriente a cuantificar, el número de submuestras por muestra (de 25 a 50), los elementos utilizados para la extracción y el acondicionamiento de las muestras hasta su llegada al laboratorio (Carretero et al., 2016).

La etapa de interpretación puede ser definida en términos generales como el proceso mediante el cual se trata de encontrar un significado más amplio sobre información empírica recabada. Generalmente, para una mejor interpretación es necesario conocer el marco y/o contexto en el que se realiza la misma (ej: la zona, el ambiente, dinámica de nutrientes, etc.). En la actualidad, la mayoría de los métodos de diagnóstico de deficiencias de nutrientes basados en determinaciones de suelo contemplan la cuantificación de fracciones inorgánicas lábiles (para nutrientes móviles) o de índices que tratan de extraer una fracción proporcional de nutrientes semejante al que toman las raíces de las plantas (para nutrientes de baja movilidad) (Barbazán y García, 2015). Estos métodos en general han presentado moderada capacidad predictiva de la respuesta al agregado de los

diferentes nutrientes, por lo tanto, la investigación e inclusión de otros factores o formas de nutrientes a los modelos actuales de diagnóstico permitiría reducir su incertidumbre y mejorar la interpretación de los análisis de suelo debido a una mejor comprensión del contexto o marco. El objetivo del presente trabajo es realizar una revisión resumida sobre los principales avances en la interpretación de los análisis de suelos que se han realizado en los últimos años para los principales nutrientes móviles (nitrógeno y azufre) y de baja movilidad (fósforo y cinc) que limitan la producción de los cultivos extensivos en la Región Pampeana Argentina.

## Nitrógeno

La metodología más difundida para el diagnóstico de nitrógeno (N) se basa en la determinación del contenido de N-nitrato en suelo previo a la siembra del cultivo (profundidad de 0-60 cm). Para el cultivo de maíz, Correndo (2018) realizó un meta-análisis sobre ensayos de fertilización nitrogenada realizados en la región pampeana y determinaron una disponibilidad de N crítica en

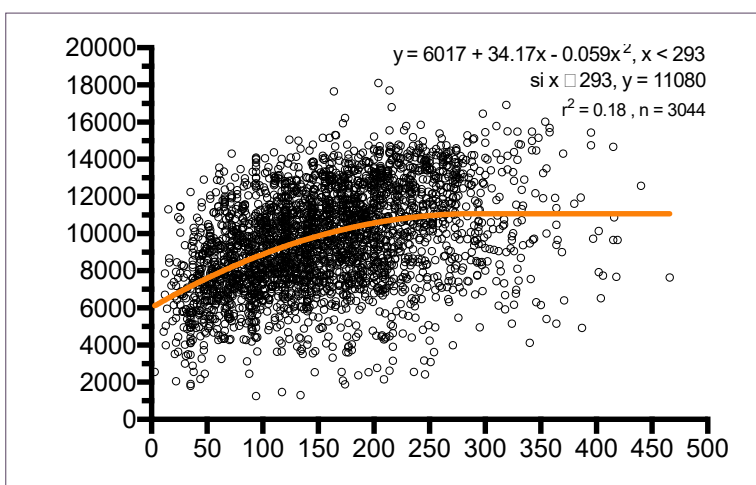


Figura 1. Rendimiento de maíz en función de la disponibilidad de N (suelo + fertilizante) previo a la siembra del cultivo para la Región Pampeana Argentina (Correndo et al., 2018).

presiembrado de 293 kg N ha<sup>-1</sup> para rendimientos de 11 tn/ha. No obstante, el ajuste del modelo fue solo del 18% (Figura 1). Por lo tanto, identificar y estudiar las variables que condicionan la respuesta a N permitirían generar modelos de diagnóstico más precisos que los actuales y, por ende, maximizar la eficiencia de uso del fertilizante aplicado.

En los últimos años se han propuesto distintos umbrales de disponibilidad de N (suelo más fertilizante), los cuales varían en función de diferentes factores entre los que se destacan: 1- el potencial de rendimiento, 2- la textura del suelo, 3- el potencial de mineralización del suelo y 4- el efecto del cultivo antecesor (Diez, 2017; Orcellet et al., 2017; Correndo et al., 2018). Trabajos recientes para maíz, determinaron que el umbral crítico de disponibilidad de N es función del potencial de rendimiento del cultivo. El umbral varió desde 133 kg N ha<sup>-1</sup> para rendimientos máximos medios de 6.5 t ha<sup>-1</sup> hasta 304 kg N ha<sup>-1</sup> para rendimientos de 14.1 t ha<sup>-1</sup> (Correndo et al., 2018). Esto representó un incremento medio de 22.6 kg N en el umbral por tonelada de maíz al cambiar de curva de potencial de rendimiento (Figura 2). La separación de las poblaciones de datos en función del potencial de rendimiento del cultivo permitió incrementar la capacidad predictiva del método de diagnóstico desde un 18% hasta un 45% según ambiente.

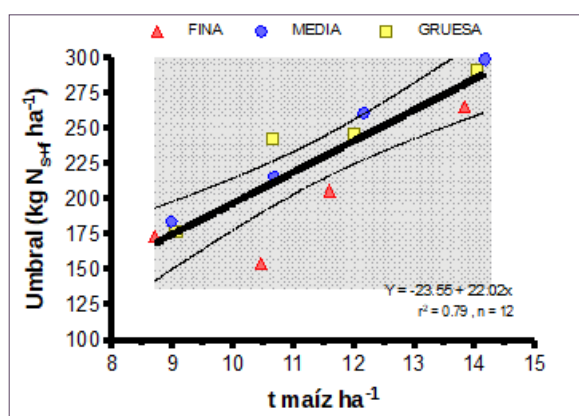


Figura 2. Relación entre el umbral de disponibilidad de N estimado y el potencial de rendimiento de maíz (t ha<sup>-1</sup>). La franja vertical gris representa el intervalo de confianza (95%) de la curva de ajuste (Correndo et al., 2018).

Respecto al efecto de la textura del suelo, Correndo et al. (2018) informaron que el rendimiento del testigo resultó hasta un 83% menor en suelos de la clase fina (>90% de limo + arcilla) respecto a los de clase gruesa (promedio de 50% de limo + arcilla). Por lo tanto, los suelos de clase textural fina, al expresar rendimientos sin N más bajos que en otras texturas -y potenciales similares-, registraron un mayor potencial de respuesta al agregado de N (Figura 3). No obstante, dichos autores no observaron diferencias significativas en el umbral crítico entre clases texturales. Así, se observó que, independientemente de la textura, el umbral estaría determinado por el potencial de rendimiento, mientras que la textura no afectaría al umbral, pero sí la tasa de la respuesta ante cambios en la disponibilidad de N (Figuras 2 y 3).

Como se mencionó, otro aspecto a considerar para mejorar la interpretación del análisis de suelo es considerar el aporte de N desde la fracción orgánica del suelo. En general, los métodos de diagnósticos basados en la determinación del contenido de N en presiembrado no contemplan

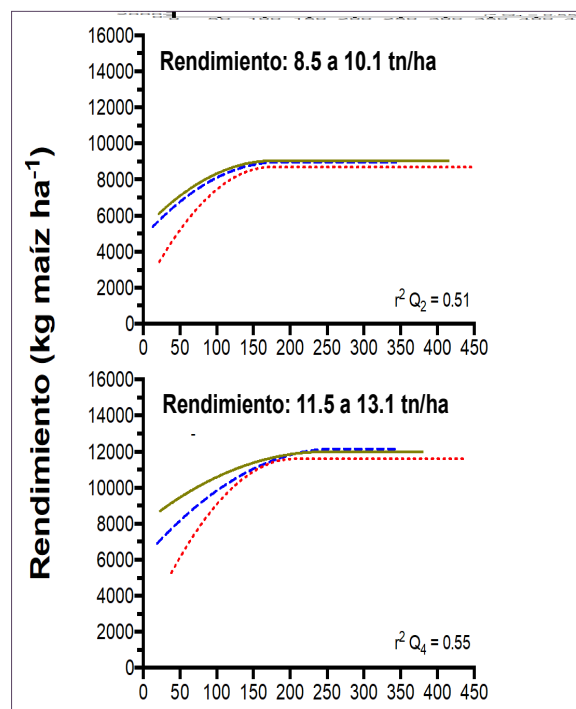
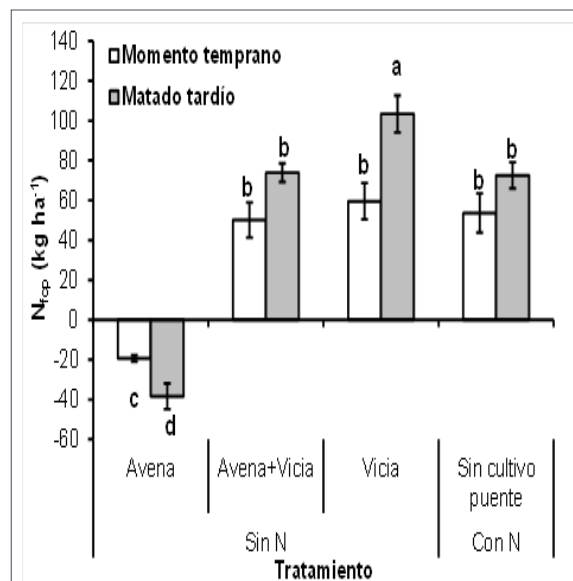


Figura 3. Relación entre rendimiento de maíz y el nivel de N disponible para ensayos de diferente potencial de rendimiento segregado en tres categorías texturales de suelo (Correndo et al., 2018).

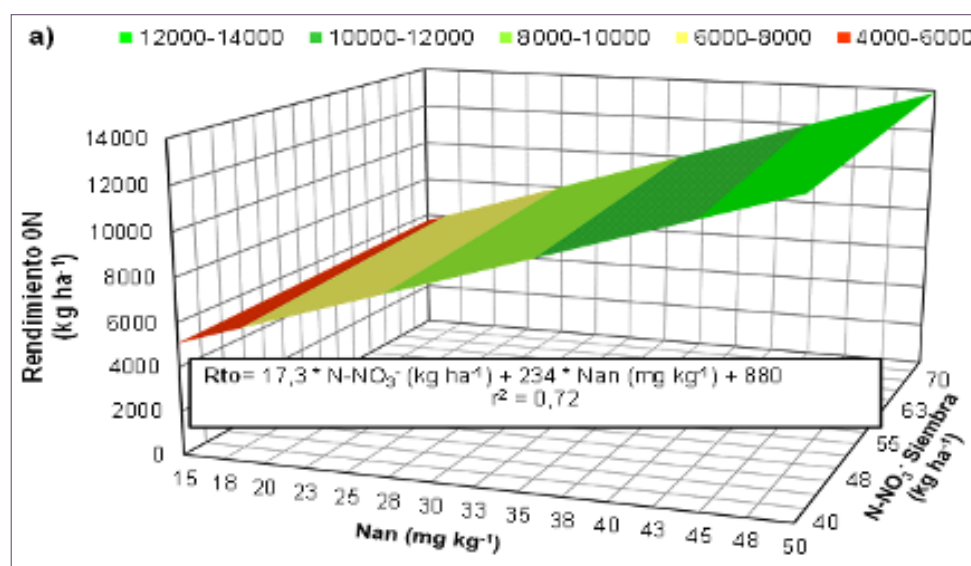
de manera directa el aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo (pasaje de N en la materia orgánica a N disponible para el cultivo), el cual representa una fuente de N importante para los mismos (Reussi Calvo et al., 2018). A modo de ejemplo, el aporte de N por dicho proceso puede satisfacer hasta el 80% de la demanda de N de un cultivo de maíz en la región pampeana núcleo (Orcellet et al., 2017). Trabajos recientes han demostrado que el aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo puede variar desde 22 hasta 232 kg N/ha según zona, cultivo y fecha de siembra (Reussi Calvo et al., 2018). En los últimos años, trabajos realizados para trigo y maíz, han demostrado que la incorporación del Nan (N-amonio liberado durante la incubación anaeróbica de una muestra de suelo) a los modelos tradicionales de diagnóstico mejora la estimación de las necesidades de N. A modo de ejemplo, para el sudeste bonaerense y norte de la región pampeana se ha determinado incrementos en la capacidad predictiva del rendimiento de maíz por la incorporación del Nan del 29% y 46%, respectivamente (Orcellet et al., 2017) (Figura 4).

Por último, el cultivo antecesor (sea cultivo puente o no) modifica la dinámica de N para el cultivo posterior en la rotación en función de la especie, relación carbono (C)/N de los residuos, tipo de suelo, temperatura, agua disponible y

momento y método de incorporación, entre otros (Ranells y Waggoner, 1996). Trabajos realizados en los últimos años en maíz reportaron aportes de N por efecto del cultivo antecesor que varían desde 30 hasta 100 kg N ha<sup>-1</sup> según ambiente y cultivo en consideración (Figura 5) (Diez, 2017).



**Figura 5.** Nitrógeno absorbido por efecto del cultivo puente (Nfcp) en materia seca aérea de maíz al estadio R6 en distintos momentos de interrupción (temprano: 1/10 y tardío: 30/10). Las líneas verticales en cada barra indican error estándar observado de la media (Adaptado de Diez, 2017).



**Figura 4.** Rendimiento del testigo (ON) en función del test N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en presiembra (0-60cm) y nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan; 0-20cm) para maíz temprano en el norte de la Región Pampeana (Orcellet et al., 2017).

Los modelos de diagnóstico citados (N disponible en presiembra + Nan) no contemplan el N que pudo haber sido liberado o inmovilizado por los residuos del cultivo antecesor en estadios posteriores a seis hojas ( $V_6$ ) del maíz. Si bien se ha informado que el Nan es sensible a cambios en las prácticas de manejo y uso del suelo (Genovese et al., 2009), los resultados determinados por Diez (2012), indican que no habría un efecto del cultivo antecesor inmediato sobre el Nan determinado a la siembra del maíz y, por lo tanto, debería ser considerado al momento de definir la dosis de N. Diez (2017), *determinaron que la incorporación de la relación C/N de la materia seca del cultivo puente, por un lado, y el N acumulado en materia seca, por otro, mejoró la capacidad predictiva del rendimiento relativo del cultivo de maíz y, por ende, de la dosis de N*. Estos resultados remarcan la importancia de considerar el efecto del cultivo antecesor en los actuales modelos de diagnóstico de nitrógeno para cultivos extensivos.

## Azufre

Los métodos de diagnóstico de azufre (S) basados en la determinación del contenido de S-sulfato (0-20 cm) en suelo en presiembra del cultivo han mostrado resultados contradictorios (Reussi Calvo et al., 2006; Pagani y Echeverría, 2011). Esta diferencia entre estudios se explica en parte por la variabilidad subsuperficial (> 20 cm) de S-sulfato entre sitios, que no es tomada en cuenta y que representa un compartimento muy importante para la nutrición de las plantas (San Martín y Echeverría 1995). Por lo tanto, algunos trabajos han planteado el empleo de la determinación S-sulfato a 0-60 cm de profundidad, aunque la capacidad predictiva también fue variable según caso (Prystupa et al., 2006; Pagani y Echeverría, 2011; Carciochi et al., 2016; Carciochi et al., 2018). Una posible explicación es que dicho método no contempla el aporte de S por mineralización desde la fracción orgánica durante el ciclo del cultivo (Camberato et al., 2012). Aproximadamente el 50% del S total incorporado a la biomasa aérea del cultivo de maíz es absorbido luego de la floración (Ciampitti et al., 2013). Debido a las altas temperaturas que ocurren en la Región Pampeana en ese momento, se produce un incremento en la tasa de mineralización de S. Así, es esperable que el S proveniente de esta fuente cubra gran parte del total absorbido por

el cultivo, y es por esto que debería ser tenido en cuenta con el fin de predecir con mayor exactitud el S disponible para las plantas. Trabajos realizados en EE.UU., determinaron una estrecha asociación entre la mineralización de S y el Nan en el estrato de 0-20cm (Figura 6), por lo cual este último podría ser utilizado para el diagnóstico de S en los cultivos (Wyngaard y Cabrera, 2015). En línea con lo mencionado, en la región pampeana, Carciochi et al. (2016) reportaron que el Nan explicó un 62% de la variación en la respuesta a la fertilización azufrada en maíz (Figura 7). Valores superiores a 54 mg kg<sup>-1</sup> indicarían suficiente disponibilidad de S para el cultivo. Considerando el intervalo de confianza para el umbral de Nan (entre 40 y 69 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 7), se observó que tres de los cinco sitios con valores de Nan menores a 40 mg kg<sup>-1</sup> respondieron a la fertilización azufrada, mientras que en todos los sitios con Nan superiores a 69 mg kg<sup>-1</sup> no hubo respuesta a S. Este hecho muestra que el Nan es un buen indicador para predecir la respuesta a S en condiciones de campo. En consecuencia,

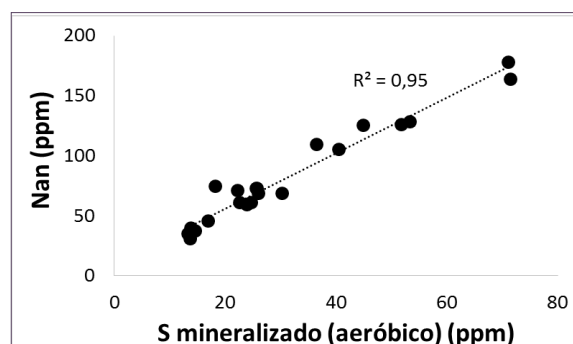


Figura 6. Relación entre el S mineralizado y el nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan) en el estrato de 0-20cm (Wyngaard y Cabrera, 2015).

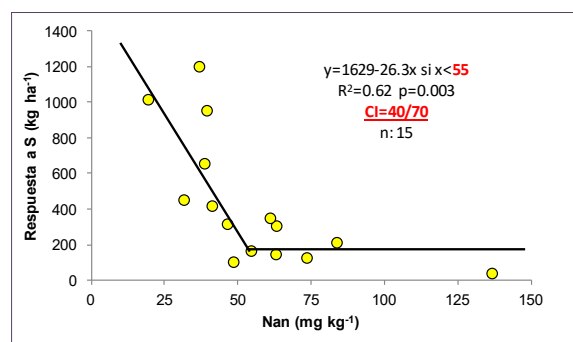


Figura 7. Relación entre la respuesta al agregado de S en maíz y el nitrógeno incubado en anaerobiosis (Nan) en el estrato de 0-20cm (Carciochi et al., 2016). CI = intervalo de confianza. n: número de sitios.

el índice Nan podría ser potencialmente usado para predecir simultáneamente la disponibilidad de S y N en el cultivo de maíz. No obstante, para el diagnóstico de S también deberían ser considerados el potencial aporte de S por parte del cultivo antecesor, la napa de agua, la tosca y/o el riego entre otras fuentes.

## Fósforo

A diferencia de lo descripto para N y S, no todo el P inorgánico está disponible para los cultivos durante su ciclo de crecimiento. Por lo tanto, utilizar al contenido de P-fosfato del suelo como un indicador de la disponibilidad de P, de la misma manera que se utilizan N-nitrato y S-sulfato para N y S, respectivamente, resultaría en la sobreestimación de la disponibilidad de P. Por tal motivo, deben utilizarse otros índices de disponibilidad, siendo el más difundido en la región pampeana el propuesto por Bray y Kurtz (1945; P-Bray) (García et al., 2015). La fracción de P extraída por este extractante ha sido asociada a la respuesta de cultivos como maíz, trigo, soja y papa (Figura 8) (Mallarino et al., 1997; García et al., 2015; Correndo, 2018).

Sin embargo, la asociación entre el rendimiento relativo de los cultivos y P-Bray suele ser baja (Correndo, 2018). Al igual que para N, el valor del umbral para P podría ser afectado por el potencial de rendimiento, la textura del suelo, el potencial de mineralización del suelo y el efecto del cultivo antecesor. En este sentido, Correndo (2018) observaron que el potencial de rendimiento no

afecta el nivel crítico para maíz. Esto es esperable para nutrientes poco móviles como el P, que llegan a la planta mediante difusión e interceptación radicular. Así, plantas con mayor rendimiento y exploración radicular tienen más acceso a P, lo que puede compensar la mayor demanda de este nutriente (Dodd y Mallarino, 2005).

Respecto a la textura del suelo, los suelos con partículas finas tienen un umbral de P-Bray más bajo, para cultivos como trigo, soja y maíz (Bell et al. 2013; Correndo et al., 2018) (Figura 9). Dicho de otra manera, los cultivos presentan menor respuesta a la fertilización fosforada en suelos arcillosos que en arenosos. Esta tendencia puede deberse a dos factores: el potencial buffer de P del suelo y la materia orgánica. El potencial buffer del suelo se define como el cambio en la cantidad de P sorbido requerido por cambio unitario en la concentración de P en la solución. Para la calibración de análisis de suelo, el enfoque más comúnmente utilizado ignora los posibles efectos de la capacidad buffer de P del suelo sobre los niveles críticos (Moody et al., 2013). Por otra parte, los suelos de textura fina presentan un mayor contenido de materia orgánica, que puede potencialmente mineralizarse liberando P disponible para las plantas, que tampoco es tenido en cuenta por los métodos de diagnóstico.

Aunque hasta el 80% del P total puede encontrarse en la fracción orgánica del suelo (Kellogg et al., 2006), no existen en la actualidad métodos que permitan estimar de manera simple y económica el potencial de mineralización de P. Un indicador recientemente propuesto de la

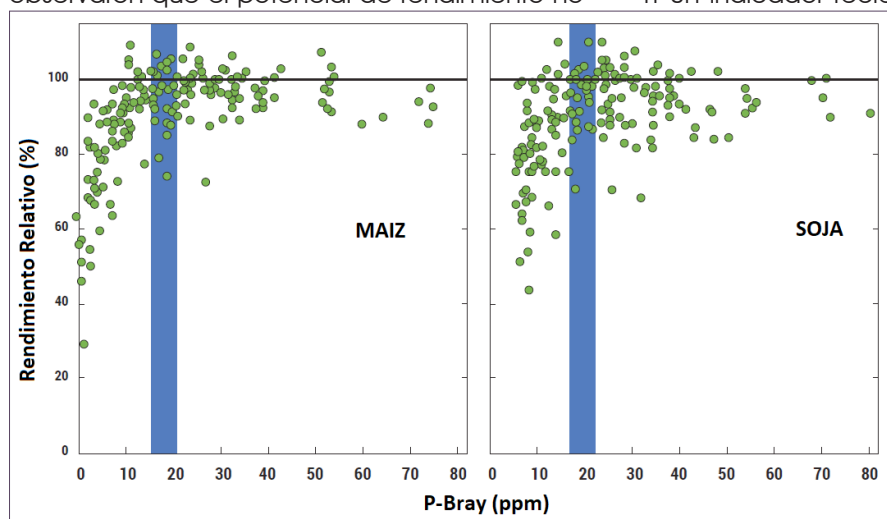


Figura 8. Relación entre el P-Bray y el rendimiento relativo del maíz y la soja (Mallarino, 1999)



capacidad del suelo para suministrar P durante el ciclo de los cultivos mediante el proceso de mineralización es el contenido de P en la fracción particulada del suelo (Ciampitti et al., 2011) (Figura 10). Se conoce como fracción particulada a aquella con un tamaño de partícula superior a los 53  $\mu\text{m}$  y se caracteriza por poseer alta respuesta al manejo y alta contribución en la dinámica de los nutrientes. Sin embargo, estudios recientes realizados en la región pampeana no observaron relación entre el P en la fracción gruesa y el rendimiento relativo de la soja (Appelhans et al., 2016) (Figura 10). Otra alternativa para estimar la mineralización de P sería utilizar el indicador Nan que, como fue previamente descrito, se ha empleado como un indicador de mineralización de S además de N. Sin embargo, esta alternativa no ha sido aún evaluada.

Por último, otra variable que podría afectar el valor de los umbrales de P-Bray es el efecto del

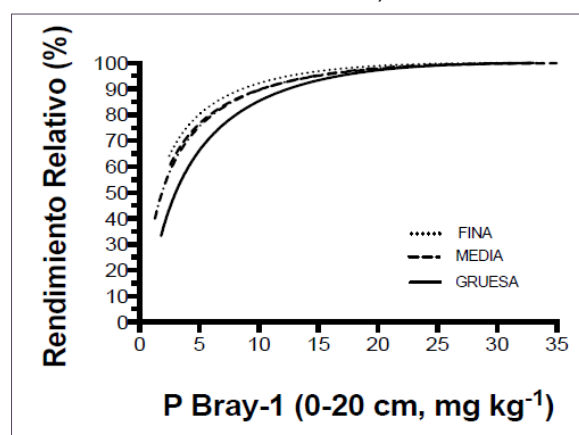


Figura 9. Relación entre el rendimiento relativo de maíz y el fósforo extractable Bray para suelos con diferente textura (n=377). Adaptado de Correndo (2018).

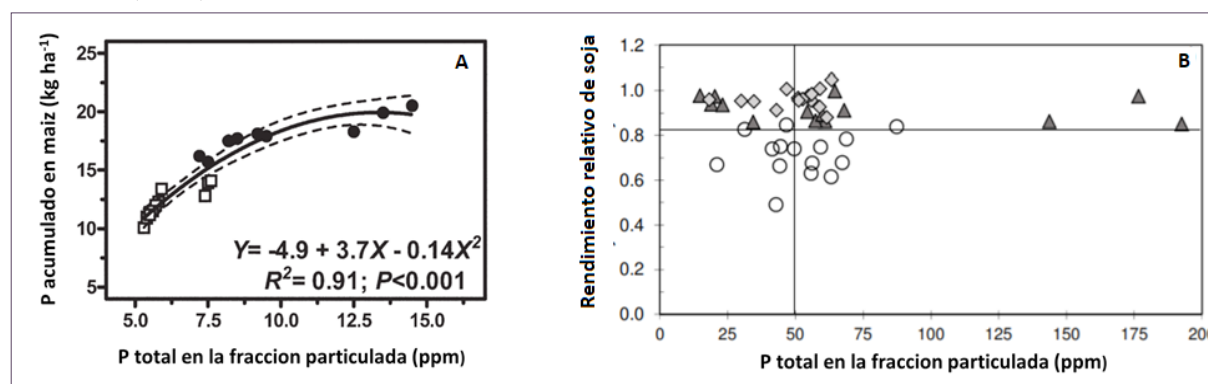


Figura 10. Relación entre el P total en la fracción particulada y A) el P absorbido por el maíz (Adaptado de Ciampitti et al., 2011) y B) el rendimiento relativo de la soja (Adaptado de Appelhans et al., 2016).

cultivo antecesor. Por ejemplo, se ha demostrado que más del 40% del P liberado durante la descomposición de los residuos de cultivos de cobertura es recuperado por el siguiente cultivo, con una eficiencia de absorción similar a la de los fertilizantes minerales (Maltais-Landry et al., 2015). En la región pampeana, Varela et al. (2014) determinaron que la liberación de P de cultivos de cobertura previos a la siembra de soja hasta el periodo crítico de dicho cultivo fue de 4.5 kg/ha para avena, 4.7 kg/ha para centeno y 1.7 kg/ha para raigrás en 2009/2010. En 2010/2011, la liberación de P desde los cultivos de cobertura alcanzó valores de hasta 16.5 kg/ha, lo que representa un 68% de la demanda de un cultivo de soja de 3 tn/ha. Es evidente así, que la contribución del cultivo antecesor es muy variable dependiendo del cultivo y de las condiciones climáticas durante la estación de crecimiento entre otros factores. Por este motivo, sería importante incorporar a los modelos de diagnóstico de fertilización fosforada la contribución del P desde los residuos.

## Cinc

A diferencia de N, S y P, el cinc (Zn) es un micronutriente, es decir, un nutriente que las plantas necesitan para su crecimiento y desarrollo, pero en baja concentración. En la Región Pampeana, la disponibilidad de Zn en los suelos ha disminuido entre un 40-70% respecto de sus niveles iniciales (Sainz Rozas et al., 2013). En este contexto, algunos estudios muestran la respuesta en rendimiento al agregado de este micronutriente en cultivos como trigo (Salvagiotti et al., 2012), maíz (Barbieri et al., 2017) y soja (Boga y Ramírez, 2014, Martínez Cuesta et al., 2016).



En la actualidad, se utilizan dos tipos de extractantes para la determinación de la disponibilidad de Zn en suelo: DTPA o Mehlich-3. Ambos métodos pueden ser utilizados, y sus resultados están relacionados (Figura 11; Martínez Cuesta, no publicado). Sin embargo, en algunos laboratorios se prioriza el uso del extractante Mehlich-3 porque permite extraer simultáneamente otros micronutrientes y macronutrientes como P, lo cual representa una ventaja como método de rutina.

Algunas variables que podrían afectar la respuesta de los cultivos a la fertilización con Zn son el: potencial de rendimiento, la textura del suelo, su pH, contenido de P Bray, contenido de materia orgánica y el efecto del cultivo antecesor. Al igual que para otros nutrientes poco móviles, se ha demostrado que el potencial de rendimiento no afecta la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización (Barbieri et al., 2017) (Figura 12).

Recientemente, Barbieri et al. (2017) evaluaron desarrollar un modelo de diagnóstico que incluya no solamente el valor de disponibilidad de Zn determinado por extracción con DTPA, sino también otras variables del suelo que afectan la disponibilidad de este nutriente en maíz (P Bray, pH, materia orgánica). Como resultado, se observó que la capacidad predictiva del modelo sólo mejoró con la inclusión de la materia orgánica, aunque la mejora fue leve. En este mismo estudio, se pudieron definir 3 rangos de valores de Zn -DTPA (Figura 13) con diferente probabilidad de respuesta a la fertilización: < 0.87 ppm alta probabilidad, de 0.87 a 1.30 ppm probabilidad media, > 1.3 ppm baja probabilidad.

Por último, el cultivo antecesor no tiene un efec-

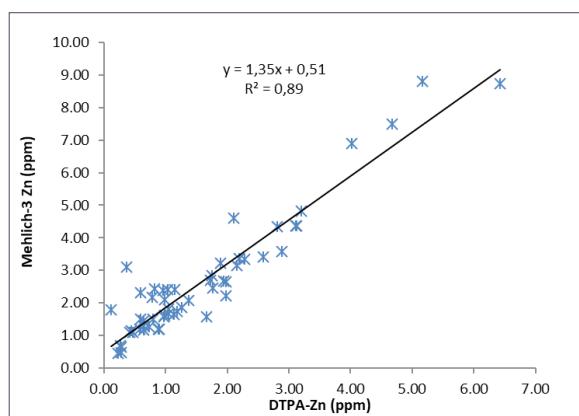


Figura 11. Relación entre el Zn extraído en suelo con Mehlich 3 o DTPA (Martínez Cuesta, no publicado).

to directo sobre la disponibilidad de Zn, ya que la concentración de dicho nutriente en residuos es baja. Sin embargo, la historia de manejo de los cultivos puede afectar la disponibilidad de Zn. En suelos de Balcarce, Crespo (datos no publicados) demostró que la disponibilidad de Zn-DTPA en suelo para soja fue superior para lotes donde durante un periodo de 9 años se implantaron de manera anual cultivos de cobertura (2.08 ppm) respecto a otros con monocultivo de soja (1.97 ppm). Esto se debería a una redistribución del Zn del suelo desde fracciones no disponibles a otras lábiles asociadas al contenido de materia orgánica.

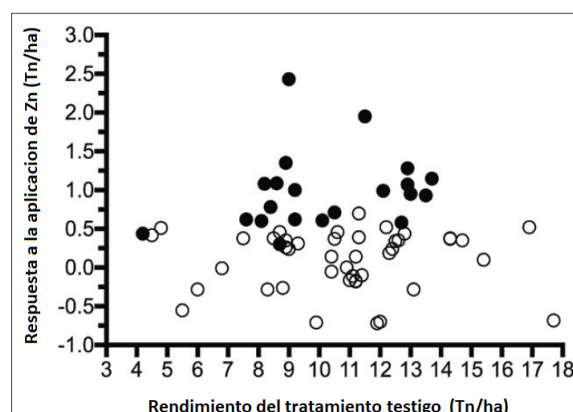


Figura 12. Relación entre el rendimiento del testigo de maíz (sin fertilización con Zn) y la respuesta del cultivo a la fertilización (Adaptado de Barbieri et al., 2017). Puntos negros: sitios con respuesta a Zn; puntos blancos: sitios sin respuesta a Zn.

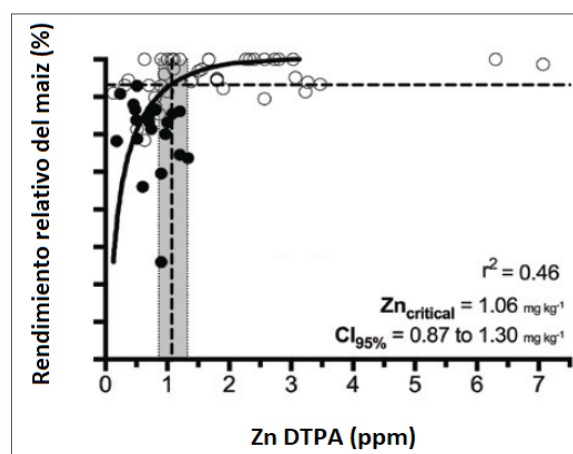


Figura 13. Relación entre el rendimiento relativo de maíz (rendimiento del tratamiento fertilizado en comparación al no fertilizado con Zn) y la concentración de Zn DTPA en el suelo. Puntos negros: sitios con respuesta a Zn; puntos blancos: sitios sin respuesta a Zn (Barbieri et al., 2017).

## Conclusiones

La interpretación de los análisis de suelo y, por lo tanto, el diagnóstico de la disponibilidad de nutrientes puede ser mejorado considerando, entre otros, los siguientes factores: 1- el potencial de rendimiento, 2- la textura del suelo, 3- el potencial de mineralización del suelo y 4- el efecto del cultivo antecesor.

1. Para nutrientes móviles como N y S, el mayor potencial de rendimiento resulta en una mayor respuesta a la fertilización, a diferencia de lo observado en nutrientes poco móviles como P y Zn cuya respuesta no se asocia al potencial.
2. En el caso de la textura, esta propiedad del suelo afecta el umbral de disponibilidad de P, pero no el de N.
3. El aporte de nutrientes desde la fracción orgánica del suelo (mineralización en suelo) debe ser considerado en el diagnóstico de fertilidad para N y S mediante el empleo del índice Nan. Sin embargo, aun es necesario desarrollar índices que permitan predecir el aporte por mineralización de P.
4. El aporte por mineralización desde los residuos del cultivo antecesor deberían ser tenidos en cuenta en el diagnóstico de fertilización con N, S y P.

## Bibliografía

- Appelhans S.C., R.J. Melchiori, P.A. Barbagelata, y L.E. Novelli. 2016. Assessing organic phosphorus contributions for predicting soybean response to fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80:1688-1697.
- Barbazán M y F.O. García. 2015. Evaluación de la fertilidad y recomendación de fertilización. Pp: 379-399. En: H.E. Echeverría, y F.O. García (eds). En Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Barbieri P.A., H.R. Sainz Rozas, N. Wyngaard, M. Eyherabide, N.I. Reussi Calvo, F. Salvagioti, A.A. Correndo, P.A. Barbagelata, G.P. Espósito Goya, J.C. Colazo y H.E. Echeverría. 2017. Can edaphic variables improve DTPA-based zinc diagnosis in corn? *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81:556-563.
- Bell M.J., P.W. Moody, G.C. Anderson; y W. Strong. 2013. Soil phosphorus—crop response calibration relationships and criteria for oilseeds, grain legumes and summer cereal crops grown in Australia. *Crop and Pasture Science* 64:499-513.
- Boga L. y H. Ramirez. 2014. Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y zinc en el cultivo de soja en la región pampeana norte de argentina. *Informaciones Agronómicas De Hispanoamérica, Ipní, N° 16*. Pp. 17-20.
- Bray, R.H. y L. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59: 39-46.
- Camberato, J., S Maloney y S Casteel. 2012. Sulfur deficiency in corn. [en línea] <[www.king-corn.org/news/timeless/SulfurDeficiency.pdf](http://www.king-corn.org/news/timeless/SulfurDeficiency.pdf)> [consulta: 13 junio 2017].
- Carciochi, W.D., N. Wyngaard, G.A. Divito, N.I. Reussi Calvo, M. Cabrera y H.E. Echeverría. 2016. Diagnosis of sulfur availability for corn based on soil analysis. *Biol. Fert. Soils* 52:917-926.
- Carretero, R., P.A. Marasas, E. Souza y A. Rocha, A. 2016. Conceptos de utilidad para lograr un correcto muestreo de suelos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 21:1-11.
- Ciampitti I.A., F.O. García, L.I. Picone y G. Rubio. 2011. Soil carbon and phosphorus pools in field crop rotations in Pampean soil of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:616-625.
- Ciampitti I.A., J.J. Camberato, S.T. Murrell y T.J. Vyn. 2013. Maize Nutrient Accumulation and Partitioning in Response to Plant Density and Nitrogen Rate: I. Macronutrients. *Agron. J.* 105:783-795.
- Correndo A. 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con N y P en maíz y soja en región pampeana. Tesis de maestría en producción vegetal. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Pp. 170.
- Correndo A., F. H. Gutiérrez-Boem, F. O. García, y F. Salvagioti. 2018. Attainable yield and soil texture as drivers of pre-plant Nitrogen test performance in corn in the Argentinean pampas. ASA-CSSA Meetings. Baltimore, Maryland, EE.UU.
- Diez S.N., G.F. Domínguez y G.A. Studdert. 2012. Uso de una leguminosa como alternativa de provisión de nitrógeno para el cultivo de maíz (*Zea mays* L). Actas 19° Congreso Latinoamericano y 23° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, abril 2012. En CD.
- Diez S.N. 2017. Cultivos puente: efecto sobre la disponibilidad de agua y de nitrógeno para un cultivo de maíz. Tesis de maestría en producción vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Pp. 70.
- Dodd J.R. y A.P. Mallarino. 2005. Soil-test phosphorus and crop grain yield responses to long-term

- phosphorus. Soil Sci. Soc. Am. J. 69:1118-1128.
- García O.G., L.I. Picone y I.A. Ciampitti, I.A.** 2015. Fósforo. Pp. 229-264. En: Echeverría H.E. y F.O. García (eds.). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Genovese M.F., H.E. Echeverría, G.A. Studdert y H.R. Sainz Rozas.** 2009. Nitrógeno de amino-azúcares en suelo: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. Cienc. Suelo. 27:225-236.
- Kellog L.E., S.D. Bridgham y D. Lopez-Hernandez.** 2006. A comparison of four methods of measuring gross phosphorus mineralization. Soil Sci. Soc. Am. J. 70:1349-1358.
- Mallarino A.P.** 1997. Interpretation of soil phosphorus tests for corn in soils with varying pH and calcium carbonate content. J. Prod. Agric. 10:163-167.
- Mallarino, A.** 1999. Proc. Integrated crop management conf. pp 185-192. Iowa state Univ. Extension, Ames.
- Maltais-Landry G. y E. Frossard.** 2015. Similar phosphorus transfer from cover crop residues and water-soluble mineral fertilizer to soils and a subsequent crop. Plant Soil 393: 193-205.
- Martínez Cuesta, N., W. Carciochi, H.R. Sainz Rozas, P. Barbieri, S. Silva, F. Salvagiotti y F. Ferraris.** 2016. Tecnologías de fertilización con cinc: concentración y exportación del nutriente en granos de soja. Resúmenes y mesas redondas, XXV CACS. Pp. 207.
- Moody P.W., S.D. Speirs, B.J. Scott y S.D. Mason.** 2013. Soil phosphorus tests I: What soil phosphorus pools and processes do they measure? Crop and Pasture Science 64, 461-468.
- Orcellet, J.M., N.I. Reussi Calvo, H.R. Sainz Rozas, N. Wyngaard y H.E. Echeverría.** 2017. Anaerobically incubated nitrogen improved nitrogen diagnosis in corn. Agronomy Journal 109: 291-298.
- Pagani A. y H.E. Echeverría.** 2011. Performance of sulfur diagnostic methods for corn. Agron J. 103:413-421.
- Prystupa P., F. Gutierrez Boem, F. Salvagiotti, G. Ferraris y L. Couretot.** 2006. Measuring corn response to fertilization in the Northern Pampas. Better Crops. 90: 25-27
- Reussi Calvo N.I., H.E. Echeverría y H. Sainz Rozas.** 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. Cienc Suelo. 24:77-87.
- Reussi Calvo N.I., N. Wyngaard, J.M. Orcellet, H.R. Sainz Rozas y H.E. Echeverría.** 2018. Predicting field apparent nitrogen mineralization from anaerobically incubated nitrogen. Soil Science Society of America Journal 82:502-508.
- Sainz Rozas H.R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, H. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris y M. Barra-co.** 2013 ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En: Gracia, F.; Correndo, A. (Eds.). Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable. 22-23 De Mayo 2013. Rosario. IPNI Cono Sur-Fertilizar Ac: 62-72.
- Salvagiotti F., J. Castellarin y F. Ferraguti.** 2012. Respuesta a la fertilización con zinc y boro en el cultivo de trigo en el sur de santa fe. Para mejorar la producción número 47 - INTA EEA Oliveros.
- San Martín N. y H.E. Echeverría.** 1995. Sulfato en suelos del Sudeste Bonaerense. Cienc Suelo 13:95-97
- Varela M.F., C.M. Scianca, M.A. Taboada y G. Rubio.** 2014. Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina. Soil and Tillage Research, 143: 59-66.
- Wyngaard N. y M.L. Cabrera.** 2015. Measuring and estimating sulfur mineralization potential in soils amended with poultry litter or inorganic fertilizer. Biol Fertil Soils. 51: 545-552. ◀



# Brechas en la producción de secuencias de cultivos en la región pampeana según estrategias de fertilización

Andrés Grasso

Fertilizar Asociación Civil

grasso@fertilizar.org.ar

## Resumen

*Las variadas condiciones de manejo de cultivos y, en particular, de su nutrición conducen a resultados productivos dispersos que limitan la valorización de los aportes de la aplicación de fertilizantes. La implementación de diferentes estrategias, o aproximaciones para el manejo de la fertilización, tiene efectos tanto de corto como de largo plazo sobre la producción de cultivos, independientes o en secuencias, y sobre el suelo. La implementación de modelos de recomendación regionales o de nutrición balanceada incorporando indicadores de caracterización del sitio productivo y diferentes expectativas productivas permitiría mejorar la producción de cultivos y la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados con respecto a prácticas frecuentes de fertilización. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es cuantificar las diferencias en producción agrícola según planteos contrastantes de manejo de la nutrición en condiciones agrícolas representativas de la región pampeana. Luego de dos campañas de estudio, en 10 sitios representativos de la región se validaron mejoras en los rendimientos de los cultivos al implementar estrategias de fertilización recomendadas o de nutrición balanceada con respecto a la aplicación actual de esta práctica. Los rangos de mejora varían según cultivos y planteos de nutrición. En condiciones no limitadas en nutrición, los rendimientos de los cultivos son de hasta casi 20% superiores a los que se alcanzan con las prácticas actuales. En la mayoría de los cultivos y condiciones de producción la implementación de recomendaciones medias de fertilización, considerando ajustes por NPS y micronutrientes según diagnósticos por análisis de suelos y de expectativas de rendimientos, reducen, con beneficios económicos, la diferencia de producción asociada al manejo de la nutrición en casi el 50%.*

## Introducción

En la región pampeana, las variadas condiciones de manejo de cultivos y, en particular, de su nutrición conducen a resultados productivos dispersos que limitan la valorización, de los aportes de la aplicación de fertilizantes. La implementación de diferentes estrategias o aproximaciones para el manejo de la fertilización tiene efectos tanto de corto como de largo plazo sobre la producción de cultivos independientes o en secuencias y sobre el suelo. En la región, actualmente es ampliamente reconocido el aporte de la adecuada nutrición a la producción de los cultivos individualmente tal lo indican los resultados de una encuesta aproximadamente 1200 productores agrícolas realizada por Fertilizar AC (Fertilizar AC, 2017). En promedio, los encuestados esperan que la nutrición no limitante a partir de los aportes por fertilización, explique entre el 29% y 39% de los rendimientos máximos alcanzables de soja y de trigo, respectivamente (Díaz-Zorita y Grasso, 2016). Sin embargo, a pesar de estas expectativas, el área fertilizada en cultivos de cereales supera al 80% del área cultivada mientras que en el caso de cultivos de soja es inferior al 57%. Además, las dosis medias de fertilizantes aplicados también muestran diferencias entre cultivos y en todos los casos con aportes de nutrientes en cantidades inferiores a las extraídas en la producción de granos. Nitrógeno en cereales y fósforo son los elementos mayormente aplicados y en menor magnitud el azufre, mayormente aplicado en combinación con N o con P (Grasso y Díaz-Zorita, 2018; Fertilizar AC, 2019). Las necesidades de N en cultivos de soja son complementadas en una alta proporción del área cultivada a partir de la inoculación (Peticari y Piccinetti, 2019).

Este manejo de la nutrición de los cultivos reiterado en el sistema de cultivos afecta no sólo los niveles de fertilidad de los suelos, sino que también genera brechas de rendimientos



entre los diferentes planteos. Son abundantes los estudios de suelos que muestran la reducción en niveles extractables de diversos nutrientes en comparación con su estado original (Sainz Rozas et al., 2011). Por lo tanto, se espera que el manejo adecuado de la nutrición integral de los cultivos tuviera un efecto directo y relevante para mejorar la producción agrícola. Son limitados en la bibliografía los estudios locales que comparan entre planteos de manejo de diferentes estrategias de nutrición. Algunos describen los efectos acumulados en el tiempo de la aplicación de prácticas individuales validando la implementación de estrategias de manejo bajo criterios de reposición y enriquecimiento (Barraco et al., 2014; Correndo et al., 2015).

La implementación de modelos de recomendación regionales o de nutrición balanceada incorporando indicadores de caracterización del sitio productivo y diferentes expectativas productivas permitiría mejorar la producción de cultivos y la eficiencia de uso de los nutrientes aplicados con respecto a prácticas frecuentes de fertilización. El objetivo de este trabajo es cuantificar las diferencias en producción agrícola según planteos contrastantes de manejo de la nutrición en condiciones agrícolas representativas de la región pampeana.

## Materiales y métodos

Durante las campañas agrícolas 2016/2017 y 2017/18 se establecieron módulos de evaluación de larga duración en condiciones de producción representativas de sistemas agrícolas pampea-

nos (Tabla 1). En todos los casos el manejo de los cultivos es bajo prácticas de siembra directa con control químico de malezas y aplicación de prácticas de manejo de cultivos de alta producción adaptadas regionalmente (i.e. genotipos, control de plagas y enfermedades, etc.).

En cada sitio, los cultivos y secuencias evaluados fueron seleccionados por los productores y fueron representativos de decisiones frecuentes en las regiones en estudio. En la Tabla 2 se presenta la secuencia de cultivos de cada sitio y el cultivo antecesor al comienzo del ensayo. En el caso de maíz, resultaron en comportamientos similares en relación a la fecha de siembra entre los cultivos de siembra temprana o demorada y estrechamente ligados a los niveles de producción alcanzados, explicándose las diferencias entre fechas de siembra a la selección de condiciones agronómicamente favorables para la implantación y producción del cultivo. Este último fue el criterio para establecer las diferentes secuencias de cultivos entre sitios de experimentación en este estudio.

En cada sitio se establecieron cuatro tratamientos de manejo de la nutrición de los culti-

**Tabla 1.** Localización de los sitios experimentales y caracterización media de propiedades edáficas al iniciar los estudios.

Sitio	Localidad (provincia)	Profundidad			
		0-20 cm (mg ha <sup>-1</sup> )			0 – 40 cm
		Pe (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	S <sub>SO4</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	N <sub>-NO3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )
1	Nogoyá (Entre Ríos)	9,3	0,96	6,9	-
2	Tres Arroyos (Bueno Aires)	10,7	-	-	-
3,4,5	Río Cuarto (Córdoba)	22,9	0,82	8,2	27
6	Pergamino (Buenos Aires)	14,0	0,79	8,0	90
7	25 de Mayo (Buenos Aires)	8,4	0,92	5,8	42
8	25 de Mayo (Buenos Aires)	10,6	0,94	6,4	62
9	25 de Mayo (Buenos Aires)	8,9	0,86	4,9	47
10	Marcos Juárez (Córdoba)	11,0	-	2,2	-

vos: i) sin fertilización, ii) fertilización promedio aplicada en la región, iii) fertilización promedio recomendada y iv) fertilización balanceada. La dosis promedio de uso en cada región se estimó a partir de la información de encuestas a 1200 productores y técnicos en la región pampeana coordinada por Fertilizar AC durante la campaña 2015/16 (Fertilizar AC, 2017). El tratamiento de fertilización recomendada promedio se estableció para cada sitio considerando resultados de análisis de suelos y expectativas de productividad media regional según información local provista por referentes locales responsables de la conducción de los estudios. La fertilización para la nutrición balanceada de altos rendimientos se estimó según los mayores rendimientos alcanzables en cada región y considerando las demandas de NPS y Zn para tal propósito (Tabla 3). En todos los casos, las semillas sembradas de soja fueron inoculadas en el momento de la siembra con productos comerciales para evitar limitaciones nitrogenadas en su normal crecimiento y producción.

En cada sitio, los tratamientos se dispusieron en franjas de al menos 20 m de ancho y 100

m de longitud empleando equipos convencionales de siembra y conducción de los cultivos con cosecha mecánica en estadios de madurez comercial de los cultivos. Los resultados se analizaron considerando cada sitio como una repetición y por comparación entre los promedios de los rendimientos, respuestas relativas sobre el tratamiento de fertilización frecuente y la eficiencia de uso del N aplicado en cereales y del P según parámetros estadísticos descriptivos. Se emplearon pruebas de diferencias de medias significativas de T en comparaciones apareadas entre los tratamientos.

## Resultados y discusión

En todos los cultivos la implementación de las estrategias de fertilización mostró en promedio diferentes resultados en la producción de granos. Los rendimientos de cebada sin fertilización alcanzaron los 3060 kg ha<sup>-1</sup>, la mejora por el manejo de la nutrición alcanzó rendimientos de 5335 kg ha<sup>-1</sup>, una mejora del 74% con planteos de alta producción. En trigo, los rendimientos variaron entre 3187 y 4275 kg ha<sup>-1</sup>, las mejoras fueron de un 34%. El cultivo de

**Tabla 2.** Cultivos en la rotación 2016/17, 2017/18 y el cultivo antecesor al comienzo del ensayo.

Sito	Antecesor (2015/16)	Cultivo 1 (2016/17)	Cultivo 2 (2017/18)
1	Maíz	Soja	Trigo/Soja
2	Trigo/Soja	Soja	Soja
3	Soja	Maíz	Soja
4	Soja	Maíz	Soja
5	Soja	Maíz	Soja
6	Soja	Maíz	Soja
7	Trigo/Soja	Cebada/Maíz	Soja
8	Soja	Maíz	Cebada
9	Soja	Trigo/Soja	Maíz
10	Trigo	Soja 2°	Maíz

**Tabla 3.** Rangos de nutrientes aplicados según cuatro estrategias para la fertilización cultivos en la región pampeana en 10 sitios de experimentación. En el caso de fertilización con N se muestran los rangos aplicados en cultivos de cereales.

Tratamiento	Nutriente (kg ha <sup>-1</sup> )			
	N	P	S	Zn
Control sin fertilizar	0	0	0	0
Fertilización promedio aplicada regionalmente	38 a 60	7 a 14	0	0
Fertilización recomendada promedio	65 a 70	12 a 18	8 a 18	0
Fertilización para nutrición balanceada de alta producción	150 a 170	27 a 34	15 a 25	1,5



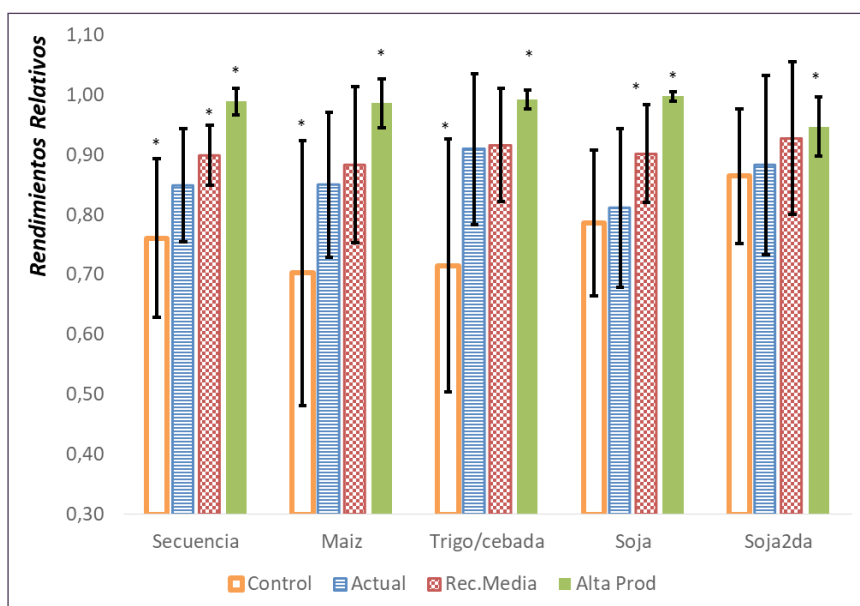
maíz tuvo mejoras de 30% en los rendimientos que fueron de 7752 a 9846 kg ha<sup>-1</sup>. En el maíz de 2° fecha de siembra, las mejoras fueron superiores que en la siembra de primera con valores de 2520 a 6520 kg ha<sup>-1</sup> entre los diferentes manejos mostrando hasta aproximadamente 160% de aumento con respecto al control sin correcciones nutricionales. En soja, con rendimientos de 2756 a 3821 kg ha<sup>-1</sup>, las mejoras fueron de un 38%. En el cultivo de soja de 2° con antecesor trigo, las mejoras de un 7% incrementaron los rendimientos de 2371 a 2545 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 4).

Los aportes de cada estrategia de nutrición integrando las diversas secuencias de cultivos estudiadas se analizó en términos de los aportes relativos a la máxima producción de cada cultivo y sitio experimental (Fig. 1).

Los rendimientos relativos se calcularon como el cociente entre el rendimiento medio de cada tratamiento, con el máximo rendimiento registrado, para cada cultivo por sitio y por campaña. En la estrategia para alta producción siempre se registraron los máximos rendimientos, tanto en la secuencia de cultivos como para cada uno de estos individualmente. La aplicación de fertilizantes, en comparación con los tratamientos control sin fertilización, contribuyó al rendimiento en un 25% en promedio para toda la secuencia de cultivos con máximos de 30% en maíz y 15% en soja de segunda. Para la secuencia de cultivos, la mejora en la

nutrición incorporando estrategias de recomendación media y para alta producción, mejoró la productividad de los sistemas hasta en un 50% respecto del manejo actual. El manejo actual más frecuente de fertilizante mostró resultados en producción próximos a los observados al aplicar recomendaciones medias, con una brecha de mejora de 10% para alcanzar el máximo rendimiento. En cultivos de soja, el manejo actual de la nutrición no se diferencia de la ausencia de la práctica. Sin embargo, en este cultivo se describieron diferencias relativas medias de casi el 50% con la aplicación de estrategias de recomendación media.

Las brechas de producción entre el manejo actual de nutrición y las estrategias de reco-



**Figura 1.** Efecto acumulado de rendimientos relativos de secuencias de cultivos en 2 campañas consecutivas en la región pampeana. Las barras verticales en cada columna indican el error estándar de la media. Los asteriscos (\*) sobre las columnas muestran diferencias significativas con respecto a la estrategia actual de manejo de nutrientes (DMS, prueba de T  $p < 0,05$ ).

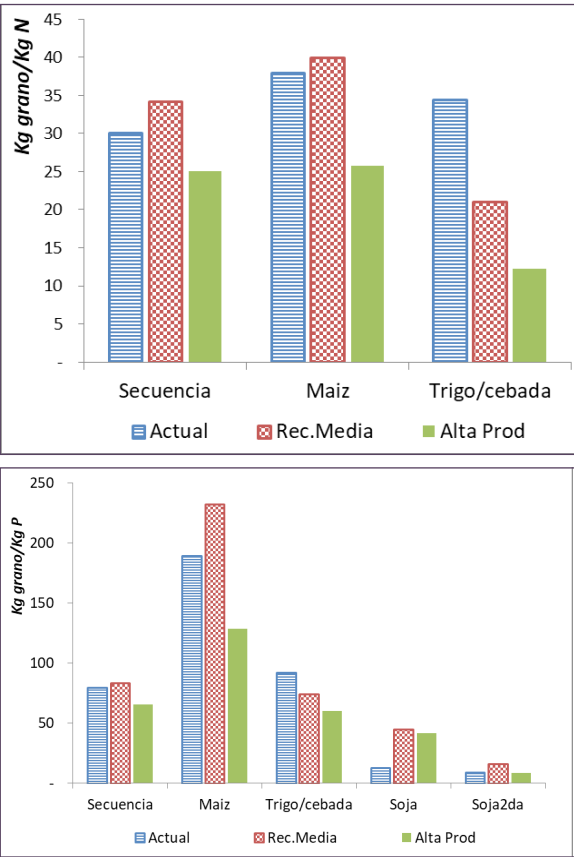
**Tabla 4.** Rendimientos promedios en kg ha<sup>-1</sup> para todos los cultivos según el manejo de la nutrición

Tratamiento	Cebada	Trigo	Maíz	Maíz 2°	Soja	Soja 2°
Control sin fertilizar	3060	3187	7752	2520	2756	2371
Fertilización promedio aplicada regionalmente	4051	4117	8679	4417	3208	2438
Fertilización recomendada promedio	4612	4017	9054	6467	3547	2606
Fertilización para nutrición balanceada de alta producción	5335	4275	9846	6521	3821	2545

mendación media y la estrategia para máxima producción se presentan en la **Tabla 5**. Las brechas de rendimiento entre el manejo actual y las estrategias de recomendación media variaron entre 46 y 513 kg ha<sup>-1</sup> según el cultivo, donde la soja fue la que mostró las mayores brechas. Esto indica que se esta perdiendo hasta un 11% de producción. Además, cuando comparamos los rendimientos del manejo actual con estrategias de alta producción, las brechas de pérdida de rendimientos fueron de 214 a 2095 kg ha<sup>-1</sup>. La soja nuevamente registro las mayores brechas seguidas por el maíz, con valores del 23% y 16%, respectivamente. Estos resultados sugieren que gran parte de las brechas actuales de rendimientos en cultivos de granos en la región pampeana están asociados a desajustes en la nutrición con NPS cuando las dosis de fertilización no están acordes a los resultados de análisis de suelos y a las expectativas de rendimientos. Si bien es reconocida su importancia para el manejo eficiente de recomendaciones de fertilización, aún es escasa la caracterización de los suelos en los sitios productivos (García y Ciampitti, 2010).

La eficiencia en el uso del N (EUN) aplicado para la producción de cereales mostró diferencias según los cultivos considerados. En el caso de trigo y de cebada al intensificarse la aplicación de fertilizantes con aumentos en las dosis de nitrógeno las mejoras en producción fueron menos que proporcionales reduciendo la EUN (**Fig. 2**). En cambio, en el caso de maíz, tanto cuando se sembró como primer cultivo como de segunda sobre antecesor trigo, al implementar estrategias recomendadas de fertilización donde se incrementó la aplicación de nitrógeno la eficiencia de uso del nutriente aumentó (**Fig. 2**). Situación similar se describió en cultivos de soja en cuanto al uso del fósforo (EUP) donde la intensificación productiva recomendada para cada región se acompañó con aumentos en la eficiencia del nutriente tanto en cultivos de siembra de primera como de segunda sobre

trigo (**Fig. 2**). La EUN aplicado en la secuencia de cultivos mostro diferencias según la estrategia de manejo de la fertilización. Cuando se aplicaron estrategias de recomendación media, y las dosis de nitrógeno se incrementaron, la EUN mejoro respecto del manejo actual, y disminuyo cuando la estrategia aplicada fue para altos rendimientos (**Fig. 2**). En el caso de trigo y de cebada al intensificarse la aplicación de fertilizantes con aumentos en las dosis de nitrógeno las mejoras en producción fueron menos que proporcionales



**Figura 2.** Eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) y del fósforo (EUP) según estrategias de fertilización de cultivos en la región pampeana.

**Tabla 5.** Brechas de rendimientos entre el manejo actual y la estrategia de recomendación media y alta producción.

Recomendación	unidades	Secuencia	Maíz	Trigo/cebada	Soja	Soja2ª
Rendimientos medios	kg ha <sup>-1</sup>	515	514	47	480	150
	%	6	4	1	11	5
Alta producción	kg ha <sup>-1</sup>	1439	2095	560	983	214
	%	16	16	9	23	7

reduciendo la eficiencia de uso (Fig. 2). En cambio, en el caso de maíz, al implementar estrategias de recomendación media de fertilización la eficiencia de uso del nutriente aumentó (Fig. 2). Situación similar se describió en la EUP, para toda la secuencia de cultivos, para el maíz, la soja y la soja de 2<sup>da</sup> donde la intensificación productiva recomendada para cada región se acompañó con aumentos en la eficiencia del nutriente (Fig. 2). El comportamiento de trigo y de cebada es similar para el uso del fósforo, que lo descripto para el uso del nitrógeno.

Uno de los análisis considerados para decidir la adopción de tecnología de la fertilización es compara la eficiencia de uso de los nutrientes [kg grano (kg nutriente)<sup>-1</sup>] por parte de los cultivos, con la relación de precios de los insumos, y la de los granos (relación insumo:producto en kg grano por kg nutriente) (Márgenes Agropecuarios, 2019). Se considera que la práctica de fertilización es rentable cuando la eficiencia de uso de los nutrientes supera a la relación insumo:producto. Las eficiencias de uso de los nutrientes siempre superaron a la relación insumo:producto en promedio para todos los cultivos y para todas las estrategias. La fertilización se justifica entre 1 y 20 veces en términos de los costos y beneficios económicos que genera, con excepción de la soja de siembra de segunda luego del trigo, donde el mejor manejo desde el punto de vista del costo de la fertilización es la estrategia de fertilización recomendada media (Tabla 6).

## Conclusiones

En condiciones de producción representativas de la región pampeana se validaron mejoras en los rendimientos de los cultivos al implementar estrategias de fertilización recomendadas o de nutrición balanceada con respecto a la aplicación actual de esta práctica. Los rangos de mejora varían según cultivos y planteos de nutrición.

En condiciones no limitadas en nutrición, los rendimientos de los cultivos son de hasta casi 20% superiores a los que se alcanzan con las practica actuales de fertilización. En la mayoría de los cultivos y condiciones de producción la implementación de recomendaciones medias de fertilización (fertilización con ajustes con NPS acordes a resultados de análisis de suelos y a expectativas frecuentes de rendimientos) reducen la diferencia de producción asociada al manejo de la nutrición en casi el 50%.

Se validó que cuando las estrategias de nutrición se intensifican, la práctica de la fertilización muestra resultados rentables sobre los costos del nutriente en hasta 20 veces.

## Agradecimientos

A Fertilizar AC y su comité técnico por el financiamiento de los estudios y los aportes en su diseño y en la discusión de los resultados. A los Ing. Agr. Luis Ventimiglia (INTA 9 de Julio), Gustavo Ferraris (INTA Pergamino), Gabriel Esposito (UNRC), Cesar Quintero (UNER) y Martín Zamora (CHEI Barrow), por la instalación, conducción y discusión de los estudios.

**Tabla 6.** Eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) y de fósforo (EUP) y relaciones insumo:producto (IP) en kg grano (kg nutriente)<sup>-1</sup> medias entre 2005 y 2019 (Márgenes Agropecuarios, 2019).

	Fertilización con N				Fertilización con P							
	Maíz		Trigo/Cebada		Maíz		Trigo/Cebada		Soja		Soja2 <sup>da</sup>	
	EUN	I/P	EUN	I/P	EUP	I/P	EUP	I/P	EUP	I/P	EUP	I/P
Actual	38	9,6	34	8,0	190	32,7	92	27,2	13	16,5	9	16,5
Recomendación media	40		21		232		74		45		16	
Alta Producción	26		12		129		60		41		9	

## Bibliografía

**Barraco, M., M. Díaz-Zorita, C. Justo & A. Lardone.**

2014. ¿Fertilización fosfatada por suficiencia o mantenimiento en secuencias agrícolas de la pampa arenosa? En: Actas del XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo - II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Producción sustentable en ambientes frágiles. AACs (ed.), Bahía Blanca, Bs. As., 5-9 mayo. 2014. AACs. Argentina.

**Caviglia, O.** 2017. Uso de recursos en diferentes sistemas de producción con énfasis en la pampa húmeda Argentina. III Workshop Internacional de Ecofisiología de cultivos, Mar del Plata (BA, Argentina), 28-29 de septiembre del 2017. <http://www.ecofisiovegetal.com.ar/presentaciones/09.-%20CAVIGLIA%20-%20III%20Workshop%20Ecofisiolog+%20A1a%20Vegetal%20-%202017.pdf> (fecha de consulta: 14 de marzo del 2018).

**Correndo A.A., M. Boxler & F.O. García.** 2015. Análisis económico del manejo de la fertilización con enfoque en el largo plazo. *Cienc. Suelo* (Argentina) 33:197-212.

**Díaz-Zorita M. & A. Grasso.** 2016. Fertilización intensificada de planteos agrícolas. XXIV Congreso Anual AAPRESID. Del 3 a 5 Agosto de 2016, Rosario, Santa Fe.

**Fertilizar AC.** 2017. Detalle de consumo de fer-

tilizantes - Extensivos. [http://www.fertilizar.org.ar/?page\\_id=468](http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468). (fecha de consulta: 25 de marzo del 2019).

**Fertilizar AC.** 2019. Detalle de consumo de fertilizantes - Extensivos. [http://www.fertilizar.org.ar/?page\\_id=468](http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468). (fecha de consulta: 14 de marzo del 2018).

**García F.O. e I. Ciampitti.** 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: El enfoque "tradicional". Actas CD XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs. Rosario (Santa Fe, Argentina), en CD.

**Grasso, A. y M. Díaz-Zorita.** 2018. Valorización de estrategias de fertilización en la región pampeana. XXVI Congreso Anual AAPRESID. Del 8 al 10 de Agosto de 2018, Ciudad de Córdoba, Córdoba.

**Márgenes Agropecuarios.** 2019. Revisa Online, Ediciones Anteriores. . <http://www.margenes.com/archives/revista>. (fecha de consulta: 25 de marzo del 2019).

**Perticari, A. y C. F. Piccinetti.** 2019. Inoculantes Microbianos en la Agricultura Argentina y aportes de la Fijación Biológica de Nitrógeno en leguminosas cultivadas. RELAR, Pto. Varas (Chile)

**Sainz Rozas H., H. Echeverría y H. Angelini.** 2011. Fósforo extractable en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 4:14-18. ◀

**Conocer más.  
Crecer mejor.**

8 y 9 de Mayo  
Metropolitano  
Rosario  
Argentina

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

**Simposio  
Fertilidad  
2019**  
Conocer más.  
Crecer mejor.

# Manejo de la fertilización de cultivos en el medio oeste de EE.UU.

Dorivar Ruiz Diaz<sup>1</sup>, Fernando Hansel<sup>1</sup>, Cristie Preston<sup>1</sup> y Andrew Stammer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kansas State University, <sup>2</sup>University of Wisconsin  
ruizdiaz@ksu.edu

## Introducción

Los principales cultivos en el medio oeste de EE.UU. – maíz, soja y trigo – continúan con un incremento constante en el potencial genético de rendimiento, aun en situaciones de estrés. Este escenario requiere el constante ajuste en las prácticas agronómicas para lograr ese potencial genético. Mejoras en la eficiencia del uso de nutrientes a través de la implementación de mejores prácticas de manejo es un componente clave. Prácticas y principios tradicionales, al igual que las herramientas de diagnóstico y recomendaciones, deben ser examinados y revisados en forma continua en virtud del alto potencial de producción. A pesar de estos cambios en el sistema, la actividad agrícola debe enmarcarse en un sistema que genere rentabilidad al productor como componente clave de sostenibilidad del sistema. Esto constituye el principal desafío actual dada las fluctuaciones del mercado de granos, con la tendencia actual a bajos precios en EE.UU. La conservación del medio ambiente y del suelo evitando la pérdida de fertilidad son aspectos que pueden ser afectados por filosofías propias del productor y factores externos como regulaciones gubernamentales.

Cultivos como soja y maíz pueden remover cantidades significativas de nutrientes por unidad de cosecha. Considerando el potencial de rendimiento actual de estos cultivos, las deficiencias nutricionales pueden aparecer incluso después de pocos años dentro del sistema de rotación agrícola. Esto es una realidad para muchos productores en el medio oeste de EE.UU., motivando a muchos agrónomos a considerar muestreos de suelos más frecuentes (principalmente para fósforo (P)), y ajustes a las dosis de fertilización, con énfasis en un sistema sostenible de rotación agrícola.

El manejo adecuado de macronutrientes (particularmente nitrógeno (N) y P) tienen un mayor impacto en el retorno económico para los

productores en el medio oeste de EE.UU. Sin embargo, micronutrientes como zinc (Zn), cloro (Cl), hierro (Fe); y nutrientes secundarios como el azufre (S) pueden ser la principal limitante en algunos suelos, observándose respuestas en rendimiento más frecuentes en los últimos años. El uso de la fertilización de arranque con fertilizantes líquidos es frecuente para maíz. Esta práctica es definida como la aplicación a siembra de una dosis baja de fertilizante (normalmente N y P) aplicado en banda en proximidad a la semilla. El resto de la dosis total requerida es normalmente aplicado en forma separada en una pasada de fertilización. Las respuestas a la fertilización de arranque de maíz y soja varían dependiendo del nivel de fertilidad del suelo, potencial de rendimiento, y del tipo de labranza.

Actualmente, el consumidor promedio en EE.UU. demanda la producción sostenible de alimentos, incluyendo responsabilidad en cada fase de la producción, transporte, y manejo de alimentos, y minimizando el impacto medioambiental. Esto ha creado un renovado interés en aspectos claves de la producción agrícola, incluyendo el uso adecuado de fertilizantes debido a la demanda energética para la producción de los mismos, además del potencial de pérdidas en el medioambiente. Aspectos relevantes al uso de fertilizantes y la fertilidad de suelos incluyen el efecto de manejo a mediano y largo plazo, el incremento en la eficiencia de uso de nutrientes, la calidad de granos producidos, así como la salud de suelo.

## Estrategias de fertilización y respuestas a largo plazo

En ciertas situaciones, se requieren varios años de aplicación de fertilizantes fosfatados para notar el efecto agronómico y ambiental de la forma y la dosis de aplicación de fertilizantes. En ensayos a largo plazo en Kansas se han evaluado estrategias específicas de fertilización, así como el efecto ambiental de sistemas de laboreo y



fertilización (Adee et al., 2016a; Preston et al., 2019). Estos estudios han demostrado pérdidas potenciales de P en aguas superficiales bajo sistemas de labranza mínima (normalmente como P disuelto). Desde el punto de vista agronómico, la aplicación de P en bandas profundas pocas veces resulta en rendimientos más altos en comparación con voleo superficial. Sin embargo, en el estudio de Preston et al. (2019) para sistemas de alto rendimiento, la aplicación dividida de P (arranque y voleo) a la siembra aumentó el rendimiento promedio de grano (Fig. 1). El uso combinado de fertilizantes de arranque con fertilizantes en banda profunda y voleo superficial también contribuyó a un mayor contenido de P en la planta y al incremento de P en el grano. Estos efectos fueron evidentes en el transcurso de este estudio, pero particularmente después de varios años de aplicación de los tratamientos. El uso de fertilizantes de arranque con fuentes líquidas (APP) contribuyó a obtener mayores rendimientos específicamente en ambientes de alto potencial de rendimiento.

El fertilizante fosfatado en la rotación maíz-soja es frecuentemente aplicado antes del maíz, y destinado para ambos cultivos. Sin embargo, con altos niveles de rendimiento y remoción de este nutriente, muchos sistemas corren el riesgo de un déficit en el balance nutricional (Arruda et al., 2019) (Fig. 2). La aplicación de fertilizantes a través de voleo superficial contribuye a una mayor remoción de P, ocasionado por un incremento en la remoción del mismo en el cultivo de la soja (rendimiento y concentración de P en grano). Pequeñas diferencias en rendimiento y remoción de P no fueron detectables para años individuales, pero evidente para el periodo completo de 10 años (Arruda et al., 2019).

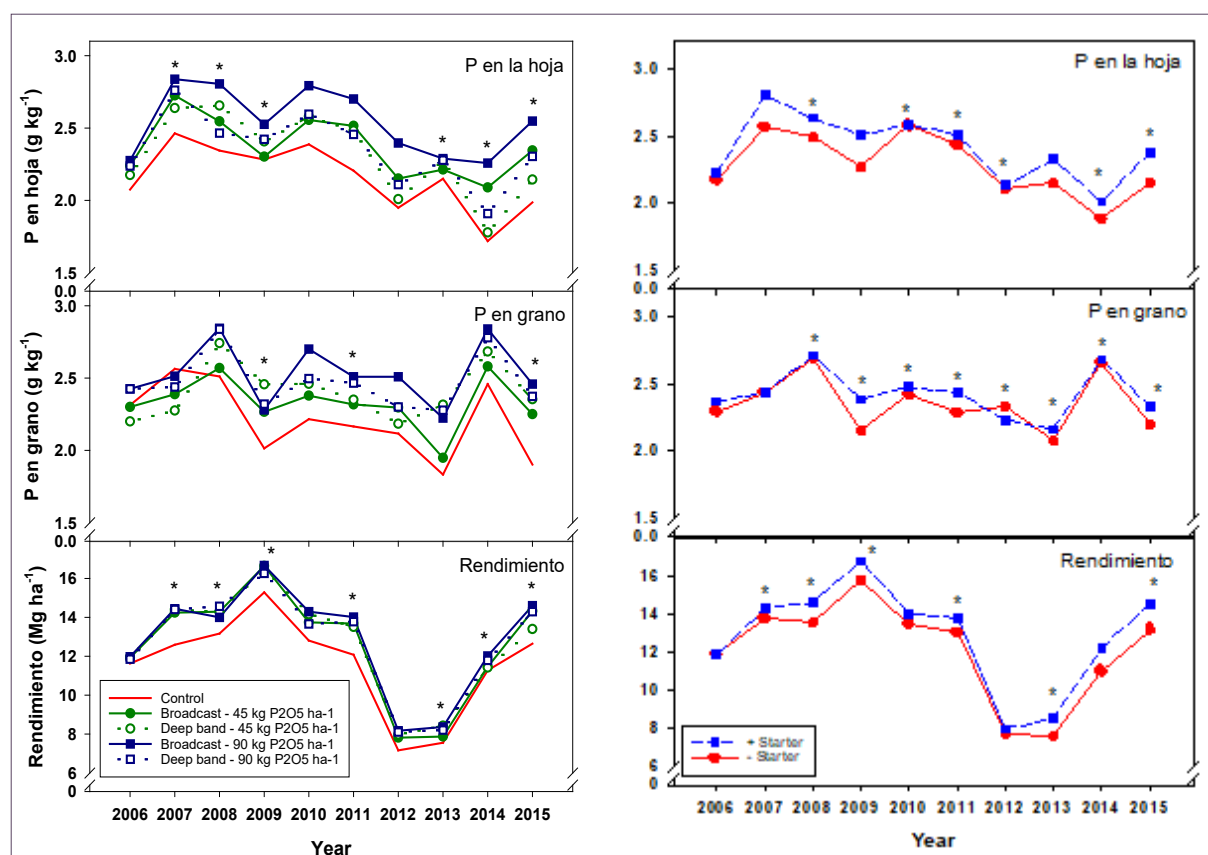


Figura 1. El efecto de la forma y dosis de P en maíz en ensayos de largo plazo. Aplicaciones en banda y voleo superficial con la utilización de fertilizantes granulados (superfosfato triple); y arrancadores al momento de la siembra con el uso de fertilizantes líquidos (polifosfato de amonio) (Preston et al., 2019).



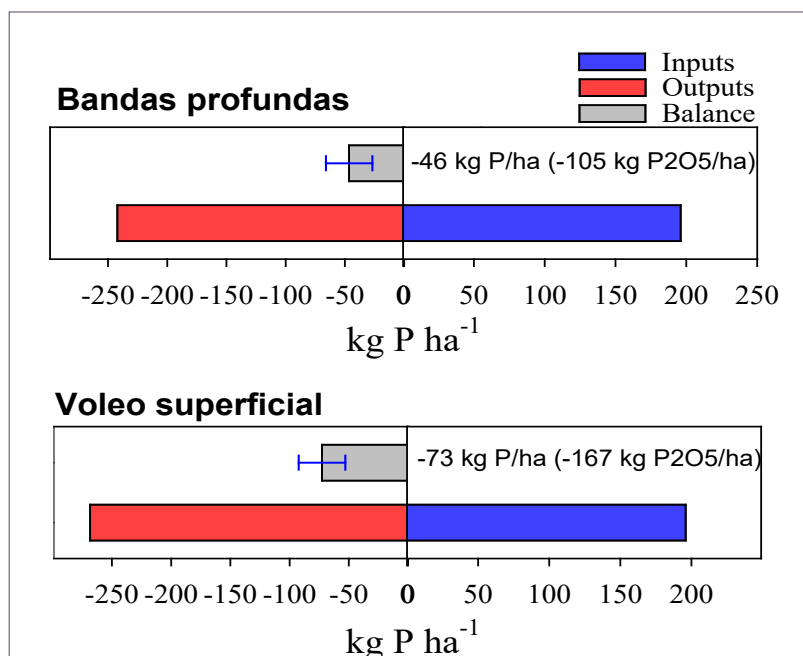
## Eficiencia de sistemas productivos en el uso de nutrientes

Los sistemas de alta productividad remueven cantidades significativas de nutrientes, pero la eficiencia (eficiencia interna) en el uso de N tiende a incrementar para sistemas de alto rendimiento. En distintos ensayos en Kansas se han evaluado sistemas de producción bajo irrigación (rendimientos altos) y secano (rendimientos bajos) para el uso de N en maíz (Fig. 3). En estos ensayos se observa una tendencia con mayores rendimientos por unidad de N total absorbido por la planta para los sistemas bajo irrigación. Generalmente este incremento en eficiencia tiene como consecuencia una disminución en la concentración de N en grano. La disminución en la concentración de N en grano no es considerado problemático para el caso del maíz, sin embargo, para el caso del trigo, el cambio en el contenido de N (proteína) es un parámetro clave en la calidad del grano.

Actualmente el productor promedio en Kansas y el medio oeste de EE.UU. no percibe un valor adicional por calidad de grano, por lo tanto, el enfoque es normalmente optimizar el rendimiento. Sin embargo, en algunos casos

existe un enfoque hacia calidad del grano, ya que constituye una forma de diferenciar el cultivo, constituyendo un mercado especial para estos casos. Estos mercados (nichos o *specialty markets*) que ofrecen un precio diferencial por calidad premium están ganando popularidad en el medio oeste de EE.UU. y pueden expandirse en el futuro. La calidad de grano (especialmente proteína en trigo) es afectada en forma directa por el nivel de rendimiento, así como la dosis, y momento de aplicación de N. El dilema para los productores de trigo en nuestra región es incrementar la eficiencia y rendimiento sin sacrificar la calidad, un aspecto menos crítico para otros granos como el maíz.

Si bien el papel del N en la determinación de proteína en el grano del trigo está bien establecido, la información sobre otros nutrientes es escasa. Específicamente, el rol del azufre (S) en la concentración de proteína y en la calidad de la misma durante la cocción de harinas; aspecto demandado por la industria actual. La fertilización balanceada es un componente crítico en la calidad de grano, y es un aspecto que está generando más interés para ciertos cultivos en el medio oeste de EE.UU. tales como el trigo.

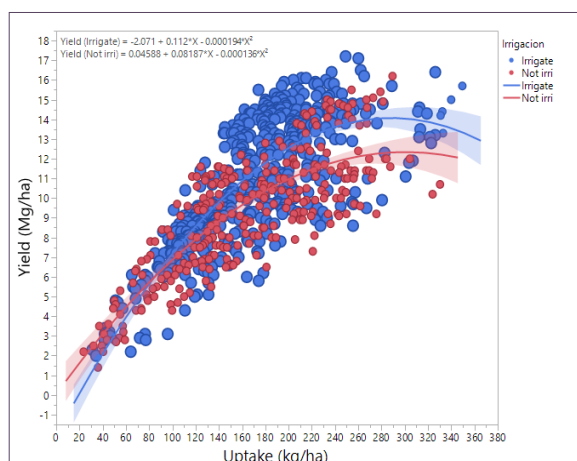


**Figura 2.** Balance total de P en una rotación maíz-soja durante un periodo de 10 años. El P fue aplicado solamente antes del maíz en una dosis de 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha y destinado para los dos cultivos en la rotación (Arruda et al., 2019).

La disponibilidad de equipos de alto despeje, accesible para muchos productores de maíz abre la oportunidad para las aplicaciones tardías de N con el uso de fuentes líquidas (UAN). En ensayos recientes se demuestra que la absorción total de N por la planta puede incrementar con aplicaciones divididas (aplicaciones tardías hasta VT en maíz) (Fig. 4). Este incremento en la absorción total de N en la planta generalmente representa un incremento en los índices de eficiencia de uso (estimados en base a N en la planta). Sin embargo, estas aplicaciones tardías no resultan en incrementos consistentes de rendimiento, en suelos con bajo potencial de pérdidas de N. El mayor beneficio potencial de las aplicaciones tardías de N en maíz es en suelos con alto potencial de lixiviación o desnitrificación (aplicaciones de recobro en temporada). Por otro lado, la habilidad del maíz de absorber N durante periodos vegetativos tardíos puede facilitar el uso de sensores para el manejo de la fertilización nitrogenada.

### Estado nutricional y sanitario en la producción de soja

En trabajos anteriores se ha demostrado relaciones entre los niveles de nutrientes en el suelo y la incidencia de enfermedades, principalmente para potasio (K). En ensayos de campo en Kansas, Adey et al. (2016b) evaluaron los niveles de P y K en el suelo para el cultivo de soja. Las dosis de aplicación de K utilizadas no mostraron relación con la incidencia de enfermedades. Esto

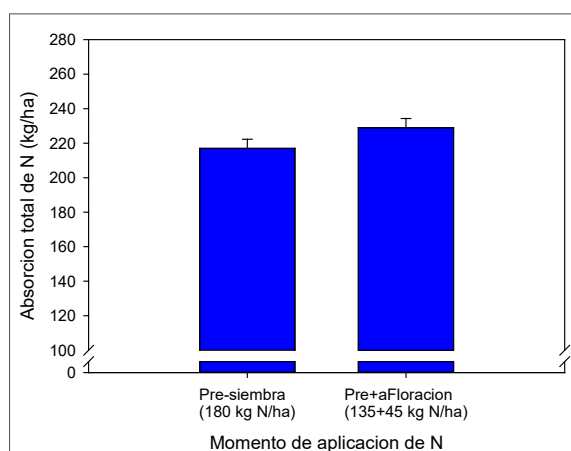


**Figura 3.** Rendimiento de maíz en función a la absorción total de N en la planta para sistemas de producción bajo irrigación y secano (Hansel y Ruiz Diaz 2019).

podría deberse a un nivel de K generalmente alto (194 ppm de K promedio). Con el aumento de los niveles de P en el suelo, la gravedad de la incidencia de *Fusarium* disminuyó a menos de la mitad, comparando la dosis de 67 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha con el testigo de 0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha (Fig. 5). Los análisis de suelo y P en la planta mostraron una relación lineal con la incidencia de *Fusarium* en soja. Otros parámetros fueron evaluados, incluyendo NDVI, altura de la planta, y número de colonias (UFC) de *F. virguliforme* en el suelo (Adey et al., 2016b).

### Conclusiones

La mayor disponibilidad actual de maquinaria y tecnología de campo genera el potencial para una mayor flexibilidad y perfeccionamiento del momento y forma de aplicación de fertilizantes. Estas prácticas permiten aplicaciones en momentos críticos de desarrollo de la planta con beneficios agronómicos y medioambientales. Por ejemplo, en estudios ecofisiológicos de maíz se han demostrado los requerimientos de N en estadios tardíos y reproductivos. El uso de fertilizantes de liberación lenta, así como aplicaciones tardías de N con equipos acordes a la altura del canopeo y el uso de fungicidas están creciendo en popularidad. Estos factores pueden contribuir al incremento en la eficiencia del uso de N en maíz, gracias a un mejor ajuste en la relación demanda/suministro del nutriente.



**Figura 4.** Absorción total de N en la planta de maíz al momento de madurez fisiológica con la aplicación de 180 kg N/ha utilizado fuentes líquidas (UAN). Momentos de aplicación antes de la siembra o aplicación dividida (135 kg N/ha pre-siembra y 45 kg N/ha al momento de la floración). Promedio de 8 localidades en Kansas.

El reciente énfasis en la agricultura sostenible da como resultado un interés renovado en la calidad de suelo (salud de suelo) como un componente clave para la producción de cultivos. Un componente fundamental de la salud de suelos es la disponibilidad de nutrientes, por lo tanto, se están promoviendo análisis químicos de salud del suelo que puedan proporcionar recomendaciones de fertilizantes. Actualmente, se están evaluando métodos como el H3A (Haney) para P, K y algunos micronutrientes como opciones al Mehlich-3, Bray-1, y acetato de amonio para K. Por otro lado, el enfoque en salud de suelo enfatiza el uso de siembra directa y el uso de cultivos de cobertura, con implicancias en el uso de fuentes y la forma de aplicación de fertilizantes para estos sistemas. Por ejemplo, el uso de arrancadores y la utilización de fertilizantes líquidos (UAN, APP) son populares en estos sistemas por la facilidad de aplicación, y mezcla con otros nutrientes críticos como el S en base a fuentes líquidas.

rows. *Front. Plant Sci.* 7:1232-1235. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01232>

Arruda M.J., D.A. Ruiz Diaz, F.D. Hansel, G. Hettiarachchi and P. Pavinato. 2019. Long-term fertilizer placement in a corn-soybean rotation affect soil phosphorus fractions and legacy. *Geoderma*. In Press

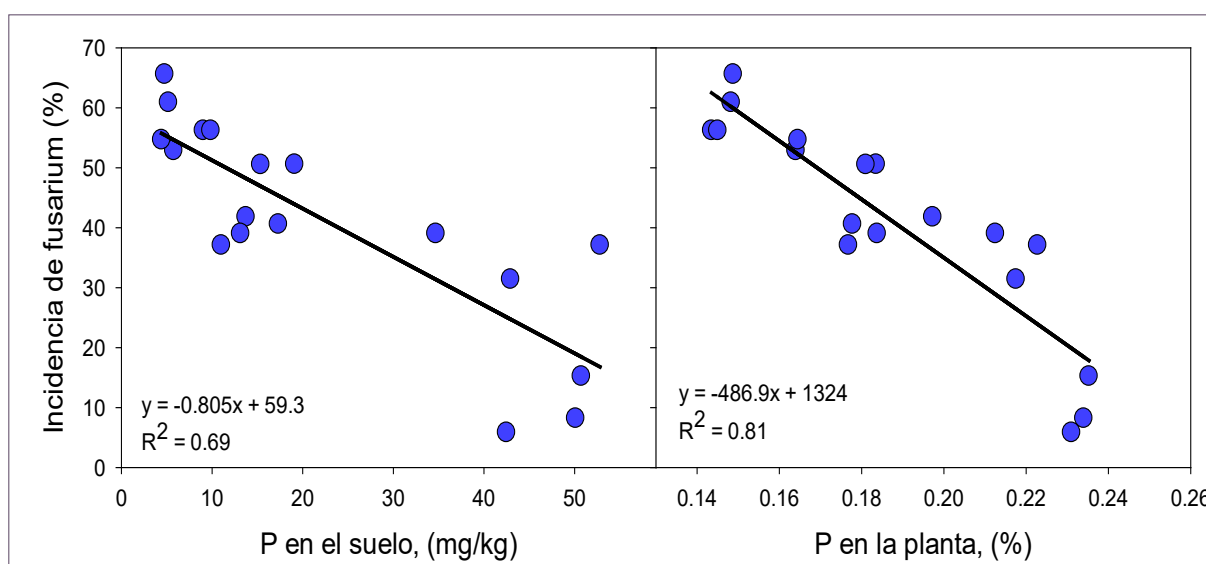
Hansel, F. and D.A. Ruiz Diaz. 2019. Long term corn response to nitrogen fertilization in Kansas. Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports: Vol. 4: Iss. 7. [https://newprairiepress.org/kaesrr/all\\_issues.html](https://newprairiepress.org/kaesrr/all_issues.html)

Preston, C.L. D.A. Ruiz Diaz and D.B. Mengel. 2019. Corn response to long-term phosphorus fertilizer application rate and placement with strip-tillage. *Agronomy Journal*. 111:1-10. doi:10.2134/agronj2017.07.0422 ◀

## Bibliografía

Adee, E., D.A. Ruiz Diaz and C. Little. 2016 Effect of soil test and phosphorus fertilization on soybean sudden death syndrome severity. *Crop, Forage and Turfgrass Manag.* doi: 10.2134/cftm2015.0193

Adee E, F. Hansel, D.A. Ruiz Diaz and K. Janssen. 2016. Corn response as affected by planting distance from the center of strip-till fertilized



**Figura 5.** Incidencia de enfermedades en el cultivo de la soja (*Fusarium virguliforme*) en función a los niveles nutricionales de P en un ensayo de larga duración (Adee et al., 2016b).

## ¿Como producir más pasto?

Elena Patrón

Grupo Agua y Leche, Uruguay

elenpatron@gmail.com



Según la FAO, la ganadería contribuye con el 46 % del Producto Bruto Interno (PIB) agrícola regional. “América Latina y el Caribe aporta el 25% de la carne vacuna del mundo con un gran potencial como sumidero de carbono”, señaló Henning Steinfeld, Oficial de Políticas Ganaderas de la FAO.

Adicionalmente, la producción pecuaria con Base PASTORIL es una parte fundamental del sistema agroalimentario, que provee alimentos de alto valor nutricional, transformando alimentos de bajo valor nutritivo (celulosa), tiene un importante papel de recuperación de la fertilidad perdida en los ciclos agrícolas (aumentos en la materia orgánica del suelo), y constituye una fuente importante de empleo e ingresos.

Siendo la ganadería el principal rubro de nuestra región, y teniendo las condiciones para diferenciarse por ser una GANADERIA a la intemperie, PASTORIL, y cuidadosa con el medio ambiente (secuestrando CO<sub>2</sub> de la atmósfera), no ha resuelto ni definido sistemas de producción eficientes y sustentables para cada zona específica, estando aún pendiente de resolver una serie de problemáticas productivas y ambientales, faltando en general Investigación sobre los Sistemas Pastoriles como tales, considerando las interacciones Suelo-Planta-Animal. “La región tiene el potencial para convertirse en el proveedor preferido de productos ganaderos

bajos en emisiones climáticas, en un mercado global donde es cada vez más frecuente que el consumidor tienda a informarse no solo de la procedencia de lo que come, sino también de los beneficios tanto para la salud, como para el ambiente y la sociedad”, en opinión de Juan Lucas Restrepo, Director de AGROSAVIA.

En ese sentido, los países de la región se han comprometido a impulsar una producción ganadera baja en emisiones, esfuerzo que recibe el apoyo de la CODEGALAC, cuya secretaría técnica ejerce la FAO. La recomendación es reducir las emisiones de metano provenientes del ganado vacuno mediante la implementación de estrategias que no impliquen costos para el productor y con tecnología que se encuentre disponible. La estrategia se orienta a mejorar la nutrición, la reproducción, la sanidad y la genética a las distintas actividades ganaderas. Al implementar este paquete de mejoras, los campos de cría logran más terneros, los establecimientos que engordan, ya sea a corral o en forma pastoril, obtienen más kilos y los tambos producen más leche por vaca. De esta forma se logra mejorar la eficiencia productiva y, al mismo tiempo, reducir las emisiones por kilogramo de carne o litro de leche producida. En el caso de mejorar la nutrición, se propone no sólo un aumento en la producción del forraje, sino también su mejor



aprovechamiento. Los ensayos demuestran que los alimentos de alta digestibilidad producen mayor cantidad de carne y leche y también menos metano. Un animal más eficiente tendrá menores emisiones de metano por kilogramo de carne o litro de leche producido.

En Uruguay y en esta región tenemos ventajas comparativas por el clima y los suelos para la producción de pasturas, alimento natural y de menor costo para los rumiantes (2 a 3 centavos de dólar/kg de materia seca, MS) y, en general, se está logrando apenas una fracción de los potenciales que tenemos, debido a que la:

- **Producción Actual de Pastos** está por debajo de su potencial (apenas entre el 30 y 50%).
- **La Utilización** es de apenas el 40-50% del disponible.
- **La Conversión** de ese Alimento es muy baja (30:1 a 40:1).

Diseñar **Sistemas Pastoriles de Producción de Carne y Leche**, es el objetivo de nuestro trabajo, ajustando el conjunto de los procesos que los integran, que trabajen en forma coordinada (concepto holístico) para que se cumplan los objetivos propuestos:

- que sea rentable,
- que no afecte la fertilidad del suelo, sino que la mejore
- y que no afecte el medio ambiente y sea socialmente justo,

y que se cumpla:

- producir al menos 15 t MS/ha
- utilizar al menos el 80% de la MS producida
- transformar la MS en una Relación 1 kg MS:1 L Leche o 12 kg MS:1 kg Carne

***Proponemos un sistema que cuide el suelo, aumente la Materia Orgánica del mismo y nos proporcione los niveles de Materia Seca (MS) necesarios (12 t como mínimo) que nos permita desarrollar una actividad rentable y competitiva con Ingresos Netos por ha que superan hoy los U\$S 500 en Ganadería de Carne***

En cualquier lugar del mundo, las pasturas pastoreadas directamente por los animales constituyen una base sólida para los Sistemas de Producción de bajo costo.

El negocio de la producción animal se basa en convertir un alimento (pasturas, granos, silajes) en otro (Carne o Leche). Cuanto más barato sea el alimento utilizado, más margen nos dejará esa producción obtenida por unidad de alimento utilizado.

Debido a la volatilidad en los precios de la leche y de la carne, debemos pensar y diseñar sistemas de bajo costo y de alta productividad/ha (1000 kg de Carne y 12.000 L de Leche/ha), sobre todo cuando la alimentación de los animales representa entre el 70% y el 80% de los costos de producción, buscando que el costo de alimentación por kg de carne producida, no supere los U\$S 0,80.

Sistemas pastoriles bien diseñados y pasturas bien manejadas, suministran un alimento de alta calidad. En esta región del mundo, que presenta ventajas comparativas para ello (por su extensión, suelos y clima), es posible producir durante casi todo el año pasturas de excelente calidad y no menos de 12 t de MS utilizadas y en secano (Ing. Agr. Ana Faber - Jornada Pasturas 2014, PGG-Wrightson PAS-Grupo Agua y Leche-INIA).

### Los Sistemas deben ser SUSTENTABLES,

**SUSTENTABLE** implica preservar y mejorar la capacidad productiva del sistema desde 3 puntos de vista:

- a) Ser económicamente rentable
- b) Mantener y/o mejorar la fertilidad del suelo
- c) No afectar al medio ambiente y cuidar la calidad de los recursos renovables y no renovables (esto incluye Suelos, Agua, Aire, Personas, etc.).

El sistema pastoril se aplica sobre el suelo, y es sustentable si compensa la extracción de nutrientes con:

#### 1. USO ADECUADO DE FERTILIZANTES (Balance de Nutrientes)

La Pastura es un ser VIVO que requiere una nu-

Alimento	Costo de los Alimentos (U\$S/kg MS)	Precio L Leche (U\$S)	Precio kg Carne (U\$S)
Pasturas	0,02 a 0,05	0,20 a 0,40	1,20 a 1,80
Silos y Henos	0,10 a 0,18		
Granos	0,20 a 0,45		

trición Balanceada (Macro y micronutrientes). Las deficiencias nutricionales en la pastura limitan la capacidad productiva de cada ambiente, y no solo producen menos forraje que las bien fertilizadas, sino que tienen menos calidad (energía y proteína) y aportan menos carbono, generando procesos de degradación de los suelos (Chan y col., 2010).

En Nueva Zelanda, la rentabilidad de los establecimientos está directamente asociada al uso del fertilizante. No existen muchos ensayos donde se haya medido la fertilización y la respuesta animal en Nueva Zelanda, sin embargo, todos los que se han realizado indican que, al aumentar la aplicación de nutrientes, que incrementan la producción de pasturas, también existe un aumento en la producción animal.

El consumo de nutrientes de una pastura, está asociado con la concentración de cada nutriente en las plantas, y la cantidad de biomasa acumulada. Las concentraciones de nutrientes en planta no se mantienen constantes durante un ciclo de crecimiento. En las etapas iniciales, con plantas jóvenes constituidas principalmente por hojas, los valores son mayores, y disminuyen en la medida que se acumulan tejidos de sostén (Lemaire y Gastal, 2009).

En un pastoreo rotativo y racional, se intenta mantener un tapiz de hojas nuevas permanentemente, y es así que para alcanzar los altos potenciales de producción que las pasturas muestran en estas latitudes, el suministro de nutrientes debe estar disponible a todo momento, por lo que la fertilidad del suelo y correcta fertilización, son imprescindibles para lograr la propuesta de 14 o 15 t MS/año.



## 2. PASTOREOS ROTATIVOS CON ALTA UTILIZACION DEL FORRAJE PRODUCIDO Y BUENA DISTRIBUCION DE LAS HECES --> Agua en la PARCELA

Debido a que el rumiante devuelve con las deyecciones el 95% de lo que ingiere, y con una interesante devolución de los nutrientes ingeridos (Tabla 1) es muy importante la localización de las deyecciones, para que comencemos a construir y aumentar la Materia Orgánica del Suelo.

Solamente es posible la buena distribución (en el lugar donde se pastorea) con el **Agua en la PARCELA**

El Agua en la PARCELA permite considerar al animal como una fertilizadora "Viva", en una estrategia que tiene por objetivo reducir tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos vírgenes, cerrando los «bucles» o flujos económicos y ecológicos de los recursos. (definición de Economía Circular).

La economía circular es reparadora y regenerativa, y pretende conseguir que los productos, componentes y recursos, en general, mantengan su utilidad y valor en todo momento. Tal como la imaginan sus creadores, la economía consiste en un ciclo continuo de desarrollo positivo que conserva y mejora el capital natural, optimiza el uso de los recursos y minimiza los riesgos del sistema al gestionar una cantidad finita de existencias y unos flujos renovables. Además, funciona de forma eficaz en todo tipo de escala.

Los nutrientes que son removidos por producciones de 1000 kg de carne/ha (50 Kg) y 10.000 Litros de Leche (43 Kg), son bastante moderados, y deben de ser repuestos luego de cada ciclo de producción (Tabla 2).

El agua en la parcela no solo permite reciclar el 95% de los nutrientes consumidos, y comenzar

**Sistema PASTORIL = Sistema Sustentable**

En la parcela

Si compensa la extracción de nutrientes de con prácticas de manejo adecuadas como:

- Pasturas PERENNES
- Uso adecuado de Fertilizantes (Balance de Nutrientes)
- Pastoreos rotativos con altas cargas con ALTA Utilización del forraje y BUENA Distribución de heces

Agua en la parcela



Producción diaria de Estiércol Novillo 300 Kg (8 Kg/100 Kg) → 24 Kg/día					
	N	P	K		
%	0,56	0,09	0,33		
Kg/día/novillo	0,13	0,02	0,08		
Kg/año/novillo	49	8	29		
Kg Fert./Año	107	89	58	253 Kg Fertiliz.	
	Urea	SuperP	KCl		
US\$/Novillo	22	25	24	US\$ 71	



### Remoción de Nutrientes en Prod. Animal Mathews et al. 1996

	CARNE <sub>(1.000 Kg)</sub> gr. nutr./Kg carne	LECHE <sub>(10.000 Lt)</sub> gr. nutr./Kg leche
Nitrógeno	59 Kg Urea 27,2	27 Kg N 0,6
Fósforo	77 Kg SuperP 6,8	6,8 Kg P 1,0
Potasio	3 Kg KCl 1,5	12 Kg K 1,2
Azufre	12,5 Kg SuperP 1,5	4 Kg S 0,4
Calcio	56 Kg SuperP 12,8	11 Kg Ca 1,1
Magnesio	3 Kg Dolomita 0,4	100 grs Mg 0,01
1.000 Kg Carne extraen = 50 Kg Nutrientes		10.000 Lt. Leche =
142 Kg Fertiliz.		152 Kg Fertiliz. 43,1 Kg Nutrientes

la fase de recuperación de la materia orgánica del suelo, sino que también permite un aumento de la producción animal (carne y leche), debido a que el animal toma más agua al encontrarse esta *"in situ"* y aumenta en estos casos hasta un 10% el consumo de MS/día y su producción diaria, además de que permite hacer una utilización racional de la pastura (al menos el 80%).

El balance de nutrientes, en el sistema pastoril, es afectado por la forma de utilización del forraje: cuando un forraje es cortado para hacer reservas, extrae gran cantidad de nutrientes, a la inversa cuando es pastoreado, la extracción de nutrientes es varias veces menor, como se puede ver en la Tabla 3.

## MANEJO DE LA FERTILIZ. EN UNA AGRICULTURA SUSTENTABLE

Fuente: Ing. Agr. Angel Berardo Fac. de Ciencias Agrarias INTA Balcarce y Lab. De Suelos Fertilab

Extracción de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y potasio (K), en distintas secuencias de cultivos con niveles de producción variables y en pasturas bajo pastoreo (P) ó corte (C).

Secuencia del cultivo* (kg/ha)	Rendimiento (kg/ha)	Extracción total y anual (entre paréntesis)			
		N	P	K	S
T-G	3200-1500	100 (50)	18 (9)	30 (15)	6 (3)
T-G	4500-2300	140 (70)	26 (13)	40 (20)	10 (5)
T-M-G ó S	4500-8000-2500	240 (80)	50 (17)	90 (30)	21 (7)
S-T/S-M	3500-4000/2500-9000	330 (110)	70 (23)	180 (60)	32 (11)
S-T/S-M (c/riego)	4000-5500/3500-12000	430 (145)	100 (33)	225 (75)	42 (14)
Pastura Corte	8000-10000	150 (150)	25 (25)	180 (180)	20 (20)
Pastura PASTOREO	6000-8000	50 (50)	3-4 (3-4)	1< (1<)	1 (1)

En caso de hacer reservas, es importante reponer los nutrientes extraídos, según los kg cosechados, o lo que es mejor aún, anticiparse a la cosecha del forraje, y fertilizar anticipadamente, según los kg que se quieran obtener (Tabla 8).

***Tener en cuenta que la producción de pasturas aumenta en cantidad y calidad a medida que la fertilidad del suelo aumenta.***

Suelos pobres y/o deficitarios, y con escasas fertilizaciones no van a suministrar una plataforma adecuada para producir pasturas en cantidad y calidad, y en esos lugares deberemos recurrir necesariamente a otros alimentos (más costosos) para nutrir a los animales, disminuyendo el margen para el productor.

Las deficiencias nutricionales en las pasturas, limitan la capacidad productiva del sistema. Además, no sólo producen menos forraje que las pasturas bien fertilizadas, sino que también aportan menos carbono al suelo y generan procesos de pérdida de calidad y degradación de los suelos (Chan y col., 2010). Afectan la morfología y el metabolismo vegetal, lo que reduce la eficiencia de utilización de recursos del ambiente (por ej., el agua), por lo que disminuye la tasa de crecimiento y la producción de forraje,

Por el contrario, suelos fértiles y si a su vez son bien fertilizados (de acuerdo a la carga que voy a manejar), van a suministrar una fuente de alimentos certera y más nutritiva a los animales, y cuando la pastura es bien UTILIZADA (> al 80%) se generan importantes aumentos en la producción que le van a dejar un buen margen al productor.

**La Fertilidad del Suelo** (corazón del Sistema) es clave para lograr esto, y si consideramos los valores propuestos por el Laboratorio Hill de Hamilton (Nueva Zelanda) (Tabla 4), la base de los nutrientes en el suelo para producir PASTURAS NUTRITIVAS debiera estar en los siguientes valores:



La materia orgánica es el indicador de fertilidad del suelo más importante (Larson y Pierce, 1991). Si no contáramos con este status de nutrientes en nuestros suelos, deberemos ir fertilizando para ir subiendo su nivel, además de los requerimientos de las pasturas para alcanzar las producciones necesarias que nos soporten la carga que vamos a trabajar; y no olvidar el agua en la parcela para reducir la exportación de los nutrientes agregados, hacia lugares no deseados y/o inapropiados.

**Una vez que contamos con este status de nutrientes en el suelo, condición necesaria pero no suficiente** para sentar las bases de un sistema pastoril, deberemos fertilizar según la carga animal que tiene nuestro sistema, es decir, para obtener la cantidad de kg de MS/ha que requiere la carga animal que pretendo mantener en el sistema (Tablas 6 y 7)

Los análisis de suelo son una buena guía para saber de dónde partimos, y como vamos evolucionando en el tiempo con el sistema. Se realizan periódicamente por los mismos lugares (transectas), la misma época del año (preferentemente la primavera tardía) y en el mismo laboratorio y un seguimiento mediante planillas que nos permitan orientarnos y realizar un correcto manejo del suelo.

El análisis de suelo me va a dar la probabilidad en la respuesta, al fertilizante a aplicar y de si lo que estoy haciendo con el suelo es sustentable o no (balance de nutrientes), pero NO determinan, con cuanto debo fertilizar. Las decisiones que tome para fertilizar se van a basar en :

- Carga Animal (Tablas 6 y 7)
- Sistema de Producción (Leche o Carne, Invernada o Cría)
- Manejo Previo (Agricultura, Corte para Reservas, Pastoreos con o sin Agua)
- Especies y Cultivares a utilizar
- Tipo de Suelos
- Riego o Secano





Debemos atender especialmente las relaciones adecuadas de los cationes del suelo (K, Ca, y Mg), ya que si bien algunos de ellos pueden estar en nivel adecuado, no así su relación con otro, por lo que vamos a tener respuesta al agregado de ese nutriente para acomodar la relación.

Relación ideal K : Mg : Ca : 01:03:09 a 01:05:25

(Vitti, 2002)

$$\text{Ca} + \text{Mg} / \text{K} = 7 - 11 / 1$$

$$\text{Ca} / \text{Mg} = 3 - 15 / 1$$

$$\text{Mg} / \text{K} = 2 - 5 / 1$$

(Vázquez, 2011)

Porcentaje de Saturación de la CIC: Ca:65 – 85 %

Mg: 6 – 12 %

K : 2 - 5%

(Vázquez, 2011)

El Análisis de Planta nos puede brindar información más ajustada que el análisis de suelos, sobre el estado nutricional de la pastura. En la **Tabla 5** se presentan los valores de NZ Fertilizer Manufacturer's Association, de los status de nutrientes de los principales minerales en planta y su valoración para la producción animal.

#### La Producción de Pasturas y su calidad Aumenta a medida que la Fertilidad del Suelo Aumenta

Este proceso de desarrollo puede llevar muchos años, si las inyecciones iniciales de fert. son bajas

La mayoría de nuestros suelos son deficientes en P, S y K

Y en Lechería presentan valores muy bajos de Materia Orgánica

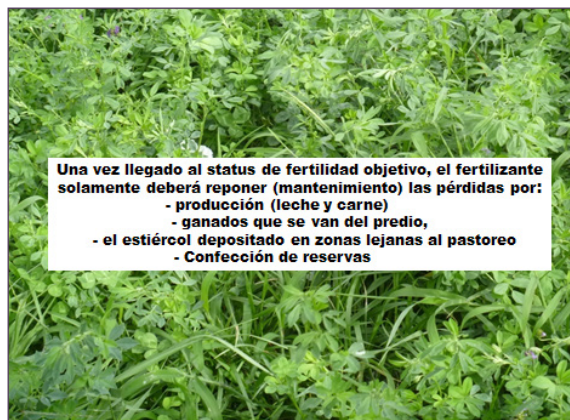
Las decisiones de Fertilización son de las más importantes en los sistemas pastoriles

#### Guía para interpretar análisis de Pasturas para el crec.óptimo

% de la M.S	Deficiente	Bajo	Óptimo	Alto
N	<4.0	4.0-4.7	4.7-5.5	>5.5
P	<0.30	0.30-0.34	0.35-0.40	>0.40
K	<2.0	2.0-2.4	2.5-3.0	>3.0
S	<0.25	0.25-0.27	0.28-0.35	>0.35
Mg	<0.15	0.15-0.17	0.18-0.22	>0.22
Ca	<0.25	0.25-0.29	0.40-0.50	>0.50

N.Z.Fertiliser Manufacturer's Research Association. 2009

Una vez establecido el status de nutrientes que tenemos en el suelo, según la carga animal que pretendemos mantenga nuestro sistema, la fertilización que debemos hacer la calculamos según las **Tablas 6 y 7** elaboradas por New Zealand Fertilizer Manufacturer's Research Association (versión Revisada en 2016).



#### Fertilización en LECHERIA según Carga/Há.-



Vacas/Há De 460 Kg PV, 330 Kg sólidos	P	K	S
2	20-28	20-50	10-23
2,5	27-36	25-58	13-30
3	34-45	40-70	16-35
3,5	43-55	50-82	19-40
4	54-65	60-95	22-45

## Fertilización en Prod. De CARNE según Carga/Há.-



<b>Cab/Há Eq.Vac 300 Kg P.V.</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>S</b>
<b>1,4</b>	<b>6 - 18</b>	<b>0 - 21</b>	<b>6 - 19</b>
<b>2,0</b>	<b>10 - 22</b>	<b>0 - 28</b>	<b>8 - 25</b>
<b>2,6</b>	<b>15 - 28</b>	<b>0 - 35</b>	<b>10 - 29</b>
<b>3,2</b>	<b>21 - 34</b>	<b>0 - 41</b>	<b>13 - 33</b>
<b>3,8</b>	<b>28 - 41</b>	<b>0 - 48</b>	<b>15 - 37</b>
<b>4,4</b>	<b>34 - 44</b>	<b>0 - 54</b>	<b>17 - 41</b>

**New Zealand Fertilizer Manufacturer`s Research Association.(Rev.,2016)  
“Fertilizer USE on New Zealand Sheep and Beef Farms”**

El pH del suelo es otro factor fundamental a tener en cuenta. Determina la posibilidad de crecimiento de ciertas plantas (un medio ácido o alcalino puede promover o limitar el desarrollo de ciertas especies). Por otro lado, también determina la disponibilidad de los nutrientes para las plantas.

*El Encalado:* el objetivo principal de la aplicación de cal al suelo fue históricamente disminuir su acidez, elevando su pH. Además de esto es una práctica que nos permite acomodar (balancear) la relación entre los cationes principales del suelo (K – Ca – Mg), definiendo precisamente la fuente del material a utilizar (calcita o dolomita). En todos los casos, previo a las fertilizaciones o

encalado debemos realizar un estudio del suelo a través de análisis físicos y químicos, como así también observar el posterior desarrollo y persistencia del cultivo.

Es una práctica común en países con tradición agrícola. Los suelos pueden ser originalmente ácidos o pueden haber aumentado su acidez por el uso intenso.

Las distintas especies vegetales tienen diferente sensibilidad o adaptación a los suelos ácidos. Entre las especies más sensibles a la acidez y con mayor respuesta al encalado se encuentran las leguminosas, siendo el caso extremo el de la alfalfa. Pero también en suelos con menor grado de acidez (con pH entre 5.8 y más) existen

respuestas positivas al encalado en numerosas especies (festucas y raigrás). En estos casos la respuesta positiva frecuentemente tiene que ver con una mejora de la utilización del P del suelo y de los fertilizantes, y/o a mejores condiciones para la actividad microbiana, ya sea en la dinámica de la materia orgánica del suelo como en la fijación biológica de N.

Los efectos positivos del encalado sobre las propiedades físicas y químicas del suelo dan como resultado una mayor producción de materia seca.

Para alcanzar altas producciones de materia seca por hectárea y por año, debemos combinar fertilizaciones balanceadas con el encalado.

Si logramos obtener altas producciones de MS y a estas producciones la utilizamos con alta eficiencia, el costo por kg MS es más bajo (U\$S 0,01 a U\$S 0,02/kg MS) que cualquier recurso alimenticio presente en el mercado. Asimismo, cuando no se produce eficientemente, el pasto pasa a ser un recurso costoso (\$0,08 a U\$S 0,10/kg MS). Por lo tanto, con estas técnicas de fertilización y encalado podemos intensificar nuestros sistemas de producciones lecheros y ganaderos, sin afectar la fertilidad del suelo, aumentando los ingresos netos del predio.



### Requerimientos de nutrientes de las diferentes especies forrajeras

También deberemos tener en cuenta de que especie de pastura estamos hablando, para nutrirla de acuerdo a sus requerimientos. no es lo mismo fertilizar alfalfa que raigrás, o cebadilla que festuca.

Para esto consideramos la **Tabla 8**, publicada por el IPNI, en cuanto a los diferentes requerimientos según la especie de que se trate, y la usamos no solo para la fertilización previo a la instalación de la pastura, sino también para las refertilizaciones anuales en las pasturas perennes, y fundamentalmente cuando se ha cortado pastura para hacer reserva, y hacer el cálculo de la reposición de los nutrientes (balance de nutrientes).

La fertilización es una de las medidas con mayor impacto productivo y económico, en la oferta de forraje, en la producción animal y en el retorno económico, y no se está usando adecuadamente, en general a nivel de predio, ni en cantidad ni en la fórmula mas adecuada para la pastura.

La pastura cosechada directamente por la vaca tiene un valor entre 5 y 20 veces menor que los concentrados, y 4 a 5 veces menos que las reservas (henos y silos), sin contar los costos de distribución y pérdidas de estas.

Por otra parte, cuanto más pastura producimos y utilizamos, menor es el costo del kg de MS producida y mayor es su contenido de nutrientes, por lo tanto, obtenemos *más producto animal por unidad de alimento producido, y mayor es la carga que puede soportar el sistema, y obtendrá más producto animal /ha.*



Tabla 1.

**EXTRACCION (Requerimientos) de MACRONUTRIENTES Y Nutrientes Secundarios**

expresados en Kg/Ton M.S.

por Dr,Fernando García. IPNI

	N	P	K	S	Ca	Mg
.....KgNut./Ton.M.Seca.....						
<b>Alfalfa</b>	25-30	2.2 - 3.3	18-25	2.5-5	11-12.5	2-3.7
<b>Trébol Rojo</b>	22	2-7-3.2	27	5-6		4,5
<b>Trébol Blanco</b>	35	3,4	19	3		
<b>Dactylis glomerata</b>	25	2.7-3.6	23-25		2,2	2,3
<b>Cebadilla</b>	14,6	2	17,3			
<b>Festuca</b>	19	3.5-4	24-28	2,5	5	2
<b>Raigrás</b>	27.5 (20-35)	3 - 3.7	24-28	2,5	4,6	2,5
<b>Sorgo Forajero</b>	10	2,8	11,7	2,6		2,1
<b>Avena</b>	20 (34)	3 (5)	3 (20)	1,8 (6)		1 (6)

Tabla 2.

**Requerimientos de MICRONUTRIENTES de distintas Especies Forrajeras expresados en**

g/Ton M.S.

	Zinc	Boro	Cobre	Manganeso	Hierro	Molibdeno
..... g Nut./Ton.M.Seca.....						
<b>Alfalfa</b>	15	25-30	7	25	30-50	0,1-1
<b>Trébol Rojo</b>		21-45	10-12			0,45
<b>Festuca</b>			14	62		0,7
<b>Gramíneas</b>		10-50	10-12			0,2-0,7

Al igual que el resto de los seres vivos  
las pasturas requieren:

**Buena NUTRICION**

**Fertilización Completa y Balanceada**

**N, P, K, S, Ca, Mg, B, Zn**

***Esto hace que lo determinante en el bolsillo del productor es la cantidad de pastura de alta calidad que somos capaces de producir, y de utilizar por ha y de transformar en producto animal.***

***Todos los factores y procesos que afectan estas 3 bases del sistema pastoril deben ser planificados, controlados y ejecutados en tiempo y forma para el logro de los objetivos.***

***Todos son importantes, y deben estar operando al mismo tiempo.***

### **Resumen Bases del Sistema PASTORIL**

1. Producción de PASTURAS (12 a 15 t de MS)
  - a. Especies y Cultivares (menú forrajero)
  - b. Fertilización
  - c. Presupuesto Forrajero y Balance
  - d. Control de Malezas Insectos y Enfermedades
  - e. Manejos y Asignaciones
2. Utilización (80%)
  - a. Diseño del Pastoreo
  - b. Agua en la Parcela
  - c. Carga/ha
  - d. Siembra Directa
  - e. Manejos (mínimo tiempo de ocupación)
3. Conversión (Carne = 12:1) (Leche = 1:1)
  - a. Balance de Nutrientes en el Rumen
  - b. Agua de calidad en la parcela
  - c. Bienestar Animal (Cero Stress, Confort Térmico,)
  - d. Minerales
  - e. Sanidad
  - f. Aporte de Fibra
  - g. Cambio diario
  - h. Tamaño de Grupo
  - i. Genética
  - j. Tipo de Animal

***La filosofía de la propuesta se basa en el logro de los siguientes procesos específicos:***

1. La siembra de especies y cultivares que maximicen cantidad y calidad en la oferta forrajera.
2. El manejo racional de las pasturas producidas manteniendo las condiciones físicas y químicas del suelo con niveles adecuados de materia orgánica y mayor rentabilidad.
3. Un uso adecuado de fertilizantes según los requerimientos de nutrientes de cada una de

las especies para maximizar la producción de forraje igual o superior a 15.000 kg de materia seca por ha.

4. Ajuste de la carga según el forraje que se va a producir (3 a 4 t MS/cabeza).
5. Trazar un diseño del sistema de pastoreo que permita usar la mayor parte del forraje producido (sistematización de áreas) y colocación del agua en la parcela.
6. Bienestar Animal, operando en el sistema en la mejor acepción del concepto del bienestar (stress, confort, etc.).

### **Bibliografía**

- Berardo, A. y Marino, M. 2014. Pasturas y Pastizales. Fertilidad de Suelos. INTA.
- Cayley, J.; Saul, G. 2004 Making Sensible Fertiliser Decisions, Publ. Agr. Victoria Institute.
- Ciganda, V. 2018. Emisiones de GEI en los Sistemas de Producción Animal en Pastoreo en Uruguay. INIA La Estanzuela.
- Com. Inv. Comercio y Promoción Carne Vacuna. 2014. La respuesta ganadera. Newsletter. Paraguay.
- Dairying Research Corporation. 1999. Fertiliser Use on N.Z. Dairy Farms.
- Faverin, C. y col. 2014. Emisiones de GEI en Sist. De Prod. de Carne Base Pastoril. Publ.
- García, F. Tabla de Requerimiento de Nutrientes en Pasturas. Publ. IPNI.
- James, B. J. F. 1974. Utilización Intensiva de Pasturas. Australia. Libro. Ed hemisferio Sur.
- Lapetina, J. L. 2014. Manejo Racional de Pastoreo. Libro. Ed. Hemisferio Sur.
- Lapetina, J. L. 2010. El Agua y la Ganadería. Libro. Ed. Hemisferio Sur.
- McMeekan, C. P. 1970. De Pasto a Leche Libro. Tr. 3ª Ed. Hemisferio Sur.
- N.Z. Fertiliser Manufacturers. 2016. Fertiliser Use on N.Z. Sheep and Beef Farms. Revista.
- N.Z. Fertiliser Manufacturers. 2016. Fertiliser Use on N.Z. Dairy Farms. Revista.
- N.Z. Meat Research and Dev. Council. Pastures for MEAT. DSIR GRASSLANDS.
- N.Z. Society of Animal Production. 1987. Feeding Livestock on Pasture. Libro 1.
- Roberts, A., 2005. Nitrogen Fertiliser Use on Pasture Crops in N.Z. Booklet. Soils and Fert Group.
- Saul, G. ;Dark, P. 2004. Making Informed decisions on phosphorus Fertiliser. Publ.
- Vanoni, E. 1991. Pastoreo Racional Intensivo. Libro. Impresiones Amawald. ◀

## La nutrición del cultivo de trigo

Fernando O. García<sup>1</sup>, Guillermo A. Divito<sup>2</sup>, y Nahuel Reussi Calvo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Consultor privado, Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce; fgarcia1957@gmail.com

<sup>2</sup>Asesor Privado. Asistente Técnico Regional Necochea AAPRESID; guillermodivito@yahoo.com.ar

<sup>3</sup>CONICET-Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, Fertilab; nreussicalvo@laboratoriofertilab.com.ar

### Importancia de la nutrición mineral para el rendimiento del cultivo

El número de granos por unidad de superficie es la variable que mayormente explica el rendimiento del trigo, y es el resultado de la tasa de crecimiento del cultivo alrededor de floración (período crítico). Para que dicha tasa sea máxima, se requiere que las hojas intercepten más del 90-95% de la radiación y que la conviertan en biomasa con la mayor eficiencia posible. Para que estos objetivos puedan ser alcanzados se requiere de una adecuada disponibilidad de nutrientes. Por otra parte, la deficiencia de nutrientes también puede reducir el rendimiento al acortar el periodo crítico, reducir la partición de biomasa hacia estructuras reproductivas o dis-

minuir la fotosíntesis durante el llenado de granos. En general, el cultivo puede tolerar deficiencias nutricionales tempranas sin que se resienta el rendimiento, siempre que éstas se reviertan antes del período crítico.

Cada nutriente cumple funciones específicas en el metabolismo de las plantas. El nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) son constituyentes esenciales de moléculas orgánicas. El potasio (K), siempre como ión, es osmoregulador y, al igual que el magnesio (Mg), es activador enzimático. El calcio (Ca) cumple funciones primordialmente estructurales como estabilizador de membranas celulares. Los micronutrientes, por su parte, son constituyentes esenciales de varias enzimas. El rol específico de cada nutriente puede ser consultado en Echeverría y García (2015).

### Síntomas de deficiencia de los principales nutrientes en trigo

Fotografías gentileza de IPNI, *Crop Nutrient Deficiency Collection*.



Una de las principales funciones del N en las plantas es ser constituyente de la clorofila. Por ello, la deficiencia se manifiesta como una clorosis de las hojas, en particular en el estrato inferior de las plantas, debido a la alta movilidad que presenta el nutriente hacia hojas del estrato superior del canopeo.

También las hojas de plantas deficientes de N muestran un menor crecimiento.

Adaptado de Divito G., A.A. Correndo y F.O. García. 2017. La nutrición del cultivo de trigo. En Divito G.A. y F.O. García (ed.). 2017. Manual del Cultivo de Trigo. Pp. 27-50. International Plant Nutrition Institute. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 224 p. ISBN 978-987-46277-3-5. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1320>





La deficiencia de **P** restringe el crecimiento y la división celular en mayor medida que la síntesis de clorofila, por lo que plantas deficientes adquieren, comúnmente, un color verde oscuro. Además, ante deficiencias severas de **P**, el color de las hojas puede tornarse púrpura por acumulación de antocianinas. Por otra parte, el menor crecimiento de la planta se puede manifestar con un menor número de macollos y raíces secundarias. Otro rasgo característico de la deficiencia del nutriente es que se demora el desarrollo del cultivo.



Trigos con inadecuada nutrición de **K** presentan crecimiento inicial despaseado y las hojas adquieren un tono verde oscuro con las puntas hacia abajo en estados juveniles. Luego, las hojas inferiores se vuelven cloróticas con márgenes y puntas necróticas. Las plantas manifiestan entrenudos cortos y tallos débiles, lo que le confiere mayor susceptibilidad al vuelco.



La deficiencia de **S** da lugar a un menor crecimiento. Las plantas presentan clorosis foliar, que comienza con el amarillamiento internerval y progresa hacia toda la superficie de la hoja. A diferencia de los síntomas de deficiencias de **N**, la clorosis se observa en hojas jóvenes debido a que el nutriente presenta menor movilidad en la planta.



Las deficiencias de **Mg** resultan en manchas cloróticas internervales.

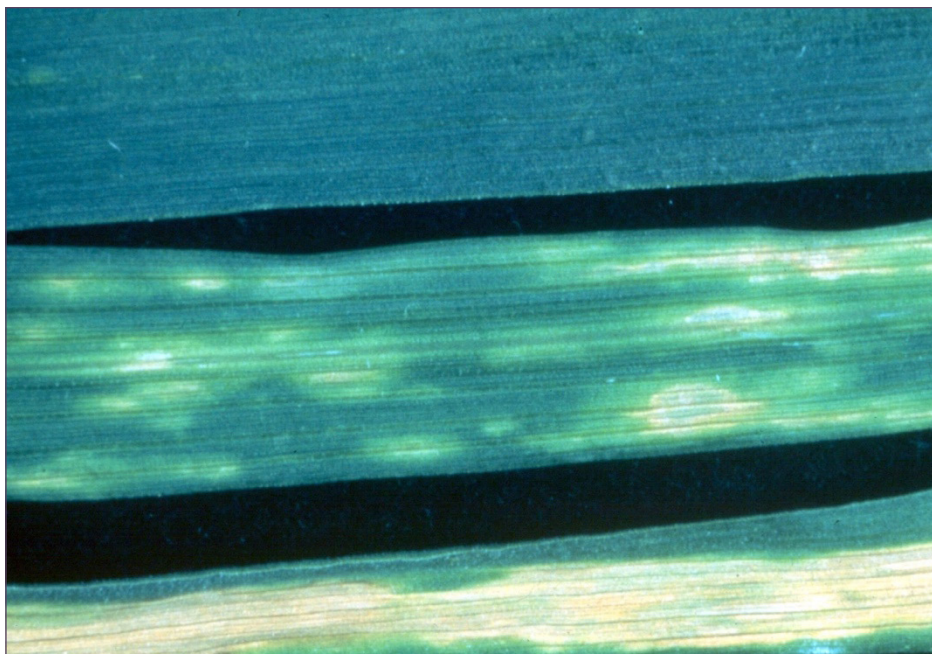




Cultivos de trigo deficientes en **cobre (Cu)** presentan puntas de hojas nuevas amarillentas o secas y espigas deformadas (falta de espiguillas y/o granos).



La inadecuada disponibilidad de **cloro (Cl)** resulta en una mayor incidencia de enfermedades y vuelco.



La clorosis intervalar de hojas jóvenes es el síntoma característico de la deficiencia de **zinc (Zn)**.

### Requerimientos de nutrientes

En la Tabla 1 se detalla la cantidad de nutrientes que el cultivo de trigo requiere para producir 1 tonelada de grano, la proporción de lo absorbido que particiona a granos (índice de cosecha) y la extracción en dichos órganos.

Además de los requerimientos totales, es importante conocer la dinámica de absorción durante el ciclo del cultivo. El trigo, al igual que otros culti-

vos, se caracteriza por un adelantamiento de la absorción de los nutrientes respecto a la materia seca. De este modo, mientras que hasta antesis acumula cerca del 40-45% de la biomasa aérea total, la acumulación de N a floración representa el 70-75% del total a madurez fisiológica. En el caso del P, el cultivo absorbe hasta antesis entre el 75-85% del total acumulado a madurez. Para S, la acumulación pre-antesis representa alrededor del 50-60% del total de S total.

**Tabla 1.** Requerimientos nutricionales (kg de nutrientes en planta para producir una tonelada de grano expresada a humedad comercial (14%)) y extracción (kg de nutrientes en una tonelada de grano). El índice de cosecha representa la proporción del total del nutriente absorbido por la planta que es destinado al grano.

Nutriente	Necesidad -- kg t grano <sup>-1</sup> --	Índice de Cosecha	Extracción -- kg t grano <sup>-1</sup> --
N	25.8	0.66	17.0
P	3.9	0.75	2.9
K	16.3	0.17	2.8
Ca	2.6	0.14	0.4
Mg	2.6	0.50	1.3
S	3.4	0.35	1.2
	-- g ha <sup>-1</sup> --		-- g ha <sup>-1</sup> --
B	21.5		
Cu	8.6	0.75	6.5
Fe	117.8	0.99	116.6
Mn	60.2	0.17	10.2
Zn	44.7	0.44	19.7

**Los requerimientos nutricionales surgen de valores promedio, y existen variaciones según la disponibilidad del nutriente, rendimiento e interacción con otros factores. Para conocer la exportación real de un lote hay que medir la concentración en el grano correspondiente al mismo.**

### Mejores prácticas de manejo de la nutrición del cultivo de trigo

La aplicación de las *mejores prácticas de manejo (MPM)* de la nutrición permite ordenar y jerarquizar las prácticas involucradas en la fertilización del cultivo. El concepto central del *Manejo Responsable de Nutrientes* es realizar, para cada situación específica, un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de cuatro "requisitos" (4Rs) básicos: la "fuente" correcta de nutrientes, en la "dosis" correcta, en el "momento" correcto, y en la "ubicación" correcta (IPNI, 2013). Existen principios científicos que guían el desarrollo de las prácticas que determinan fuente, dosis, momento y forma correctos. Globalmente, los principios son los mismos, pero la forma en que se ponen en práctica a nivel local varía en función de las condiciones de suelo, cultivo, clima, tiempo, económicas y sociales. Los agricultores y los asesores de cultivos deberán asegurarse de que las prácticas que se seleccionan y aplican a nivel local, estén de acuerdo con estos principios.

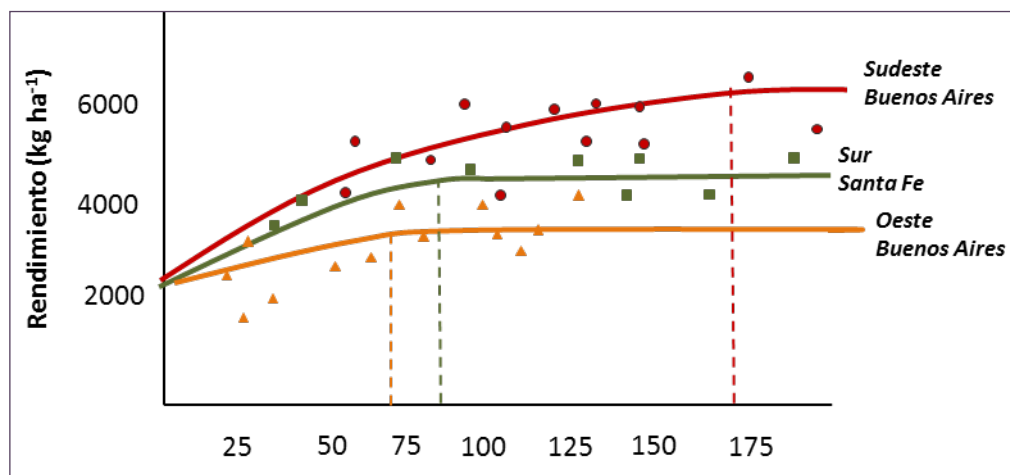
## Nitrógeno

### Dosis de N

La dosis correcta de N surge a partir del diagnóstico de la oferta del suelo y de la demanda del cultivo. Los modelos más usados son los denominados "empíricos", que se basan en la asociación entre la disponibilidad de N en el suelo y el rendimiento de los cultivos. Los balances simplificados de N y los modelos de simulación también se emplean con frecuencia. Además, los métodos sensoriales como el clorofilómetro (un tipo de sensor proximal) o sensores remotos, son alternativas para el monitoreo del estatus nitrogenado durante el ciclo del cultivo. A continuación, se discuten brevemente las principales alternativas de diagnóstico que ayudan a determinar la dosis de N en el cultivo de trigo.

### - Modelos empíricos basados en la disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo

Esta metodología se basa en el análisis de información experimental sobre la respuesta del rendimiento del cultivo ante un gradiente de disponibilidad de N en el suelo en forma de nitrato ( $N-NO_3^-$ ) sumado al N aportado por el fertilizante. Como se observa en la representación teórica de la **Figura 1**, la relación entre ambas variables depende de varios factores que se analizarán a continuación, lo que resulta en modelos diferentes según la región.



**Figura 1.** Representación teórica del rendimiento del trigo en función de la disponibilidad de N en el suelo ( $N-NO_3^-$  + N del fertilizante, kg/ha) para el sudeste de Buenos Aires, el sur de Santa Fe y el oeste de Buenos Aires. Las líneas punteadas indican el umbral crítico de N en el suelo donde el rendimiento es máximo.



La recomendación de fertilización nitrogenada con este método se realiza estimando la cantidad de N a aplicar como la diferencia entre el umbral crítico y la disponibilidad en el suelo de N como nitrato a la siembra (Ec. 1):

$$N_f = UC - N_s \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $N_f$  es la cantidad de N a aplicar como fertilizante,  $UC$  es el umbral crítico de N disponible a la siembra para maximizar el rendimiento (kg/ha) y  $N_s$  es la cantidad de  $N\text{-NO}_3^-$  (kg ha<sup>-1</sup>) en el suelo. En general, las determinaciones de  $N_s$  se realizan en el estrato 0-60 cm de profundidad. Como se indicó, existen diferencias en los  $UC$  de los modelos propuestos para la Región Pampeana. Entre las principales causas se destacan:

#### - Rendimiento objetivo

En la medida que el rendimiento objetivo del cultivo aumenta, también lo hacen los requerimientos de N (Tabla 2). Esto genera que el  $UC$  también sea mayor. Esto se evidencia al analizar la evolución de los  $UC$  propuestos para el sudeste de la provincia de Buenos Aires, que a comienzos de la década de 1990 eran de 125 kg N ha<sup>-1</sup> para rendimientos de 3500-4000 kg ha<sup>-1</sup> (González Montaner et al., 1991) y luego fueron actualizados a 175 kg N ha<sup>-1</sup> para niveles de rendimiento superiores a 5000 kg ha<sup>-1</sup> (Echeverría et al., 2001; González Montaner et al., 2003).

#### - Región

Las características del suelo y clima de la región condicionan el  $UC$  de dos formas: i) definen la demanda de N del cultivo a partir del rendimiento que éste puede alcanzar y ii) establecen la oferta de N del suelo modulando los procesos que intervienen en el ciclo del nutriente (ej. aporte de N por

mineralización, pérdidas por lavado de  $\text{NO}_3^-$ , etc.).

#### - Cultivo antecesor

Los residuos del cultivo antecesor condicionan la disponibilidad de N para el trigo. En la medida que los mismos tengan alta relación C:N (ej. maíz) se favorecerá la inmovilización del nutriente, mientras que si dicha relación es baja (ej. soja) se promoverá la mineralización. Para el sudeste bonaerense, Echeverría y Studdert (2001) estimaron que cuando el antecesor fue girasol, la disponibilidad de N fue 40 kg ha<sup>-1</sup> mayor que cuando fue maíz, mientras que cuando el antecesor fue soja, el N disponible fue 60 kg ha<sup>-1</sup> mayor.

#### - Cultivares

Los cambios en los cultivares de mayor difusión han generado variaciones en los  $UC$ . Por ejemplo, las variedades de genética francesa presentan un menor  $UC$  respecto variedades tradicionales aun cuando los rendimientos alcanzados son mayores. Dicho comportamiento sería explicado por la mayor eficiencia de uso de N (kg grano kg N<sup>-1</sup>), que se logra, en parte, mediante disminuciones en el contenido proteína en grano (Abbate, 2015).

#### - Momento de muestreo

En general, los umbrales propuestos para las distintas zonas de la región pampeana argentina se basan en la determinación de  $N\text{-NO}_3^-$  en muestras tomadas alrededor de la siembra. Sin embargo, trabajos realizados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, indican una mejor performance de los modelos que contemplan el muestreo en inicio de macollaje (Z21), debido a que reducen las variaciones atribuidas a pérdidas de  $\text{NO}_3^-$  por lavado. Así, los  $UC$  propuestos para dicho estadio son inferiores a los determinados con muestreo a la siembra del cultivo.

**Tabla 2.** Umbrales críticos de N disponible a la siembra ( $N\text{-NO}_3^-$  en 0-60 cm de profundidad + N fertilizante) para distintas zonas de la región pampeana argentina y distintos niveles de rendimiento objetivo.

Zona	Umbral crítico	Rendimiento Objetivo	Fuente
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
Sur de Santa Fe y Córdoba	130-140	4500-5000	García et al., 2010.
Centro-Sur de Santa Fe	70	2500	González Montaner (com. pers.)
Norte de Buenos Aires	100-140	3500-4000	Satorre (com. pers.)
Oeste de Buenos Aires	90	3000	González Montaner (com. pers.)
Sudeste de Buenos Aires	175	5000-5500	González Montaner et al., 2003.
Sudeste de Buenos Aires	170 (siembra) y 134 (macollaje)	> 5000	Barbieri et al., 2009.

### La dosis de N definida por los modelos empíricos no contempla el contenido de proteína de los granos ni el óptimo económico

El UC de los modelos empíricos se define considerando la disponibilidad de N que maximiza el rendimiento. No contempla la relación entre el precio del N y el precio del trigo. En este sentido, a partir de la relación entre el rendimiento del cultivo y el N disponible en el suelo ( $N_s + N_f$ ) (Figura 2A) es posible calcular la eficiencia agronómi-

ca de uso del N, que indica el rendimiento por unidad de N. Como se observa en la Figura 2B, dicha eficiencia decrece ante aumentos en el N disponible, siendo el óptimo económico el punto en el cual, dicha eficiencia iguala a la relación de precios entre el N del fertilizante y el trigo.

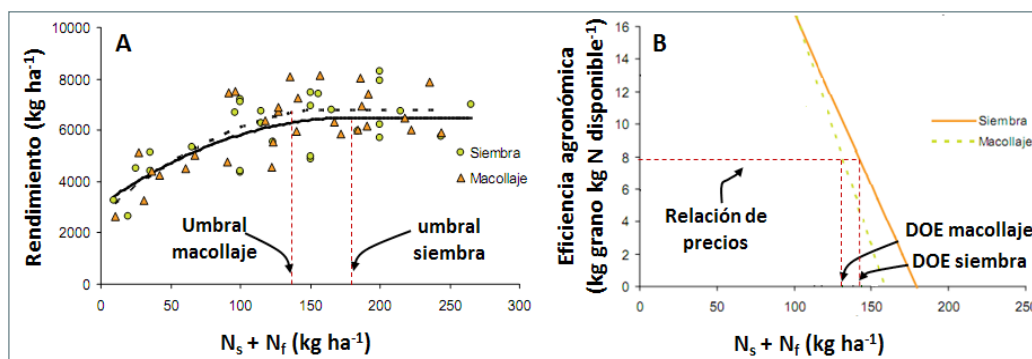


Figura 2. (A) Relación entre el rendimiento del cultivo y el N en el suelo ( $N_s$ ) más el N del fertilizante ( $N_f$ ). Muestreo a la siembra (línea llena) y al macollaje (línea punteada) en el sudeste de Buenos Aires. (B) Relación entre la eficiencia agronómica de uso de N ( $\text{kg grano kg de N disponible}^{-1}$ ) y el N en el suelo ( $N_s$ ) más el N del fertilizante ( $N_f$ ) a la siembra (línea llena) y al macollaje (línea punteada). La línea punteada horizontal indica la relación de precios  $\text{kg de N kg de trigo}^{-1}$  ( $7.9 \text{ kg kg}^{-1}$ ) promedio desde el año 2000 a 2014 (Correndo et al., 2015). DOE indica la dosis óptima económica de N. Adaptado de Barbieri et al. (2009).

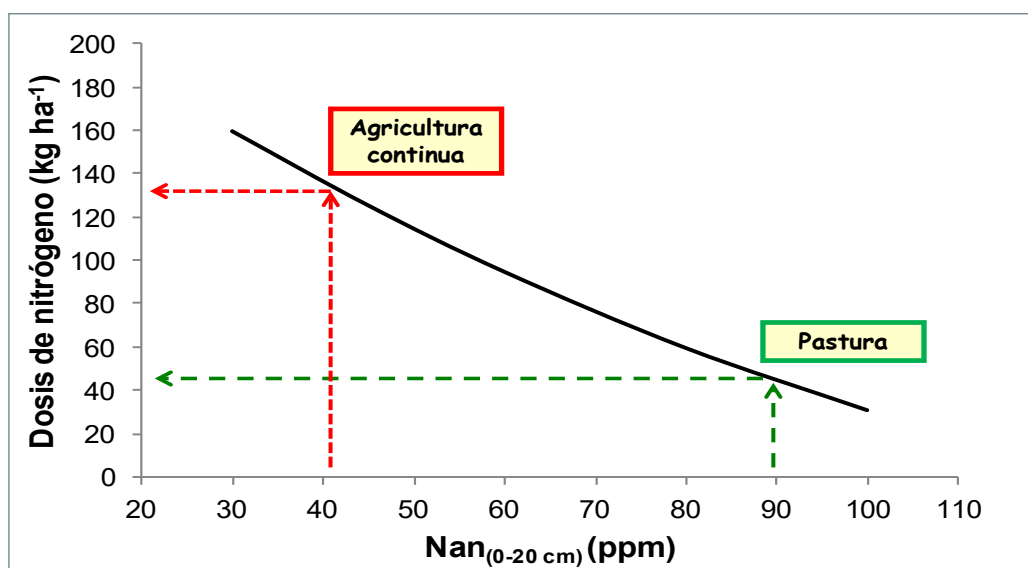


Figura 3. Dosis de N a aplicar para lograr un rendimiento de  $6000 \text{ kg ha}^{-1}$  con una disponibilidad inicial de  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  (0-60cm) en función del N anaeróbico ( $N_{an}$ ). Datos del sudeste de Buenos Aires. Adaptado de Reussi Calvo et al. (2013).



## Estimación del aporte de N por mineralización

El aporte de N a partir de la mineralización de la materia orgánica del suelo constituye una de las fuentes principales del nutriente para el cultivo. Existe una amplia variación en el contenido de materia orgánica entre suelos de distintas regiones y, mismo, entre suelos de una misma región, lo que genera diferencias en el potencial de mineralización del nutriente. En los últimos años se ha avanzado en el estudio de estimadores sencillos de dicho potencial, siendo el **N anaeróbico (Nan)** uno de los métodos que mejor performance ha mostrado. Así, su incorporación a los modelos empíricos permite un mejor ajuste de las dosis de N a aplicar. A modo de ejemplo, la incorporación del Nan evitaría la subestimación de la dosis de N en situaciones de bajo potencial de mineralización (ej. lotes con prolongada historia agrícola) o la sobrestimación de la misma en ambientes de alto potencial (ej. lotes que han tenido pasturas recientemente).

### - Balances de N

Los balances de N permiten estimar los requerimientos de fertilización a partir de la diferencia entre la demanda del cultivo y la oferta de N del suelo. La demanda ( $N_c$ ) se define de acuerdo al rendimiento esperado ( $t\ ha^{-1}$ ) y al N requerido por unidad de rendimiento ( $kg\ N\ t\ de\ grano^{-1}$ ), mientras que la oferta se establece determinando el N acumulado al momento de la siembra ( $N_s$ ) y el que se mineralizará durante el ciclo del cultivo ( $N_m$ ). Así, las necesidades de N del fertilizante ( $N_f$ ) se calculan a partir de la **Ec. 2**:

$$N_f = [N_c - (N_s/E_s) - (N_m/E_m)] / E_f \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $E_s$ ,  $E_m$  y  $E_f$  son las eficiencias de uso del  $N_s$ ,  $N_m$  y  $N_f$ , respectivamente.

En general, el empleo del balance de N demanda que el usuario defina el rendimiento objetivo, determine la cantidad de N a la siembra ( $N_s$ ) mediante muestreo de suelo y establezca, dentro de un rango, los valores para las eficiencias de uso de N. El  $N_s$  contempla, en general, la cantidad de  $N-NO_3^-$  en el estrato 0-60 cm del suelo. Comúnmente, el valor de  $N_m$  se obtiene experimentalmente a partir de incubaciones de suelo en laboratorio o a partir del N absorbido por cultivos no fertilizados. Por su parte, las eficiencias

de uso del N han sido estimadas entre 0.4-0.6 para  $E_s$ , entre 0.7-0.9 para  $E_m$  y entre 0.5-0.6 para  $E_f$ . Así, surge que, para dichas variables, el usuario del modelo deberá seleccionar valores dentro de estos rangos de acuerdo a las condiciones de suelo y clima de la región y a las prácticas agronómicas. A modo de ejemplo, para ambientes sin limitaciones hídricas, la eficiencia de uso del N del fertilizante será mayor si se realizan aplicaciones fraccionadas de fertilizante durante el ciclo del cultivo en lugar de una única en estadios iniciales.

La metodología de balances de N requiere estimaciones locales de varios de los componentes de la ecuación. Aunque se cuente con las mismas, dichos componentes contribuyen a la variación total del modelo, lo que limita notablemente su performance.

### - Modelos de simulación agronómica

Los modelos de simulación agronómica permiten diagnosticar el estatus nitrogenado del cultivo integrando características del ambiente y de manejo del cultivo. En Argentina, el software *Triguero* (Satorre et al., 2005) es el de mayor difusión, está desarrollado sobre la base de resultados generados con modelos de simulación agronómicos, en una gran variabilidad de escenarios edafoclimáticos y de manejo, para cuantificar respuestas productivas y económicas.

El usuario puede optar por distintos "escenarios" incluyendo opciones de a) cultivar, b) serie de suelo, c) disponibilidad de agua a la siembra y d) serie climática. A partir de los resultados de las simulaciones, se pueden estimar las necesidades de fertilización. Más información sobre *Triguero* está disponible en <http://www.aacrea.org.ar/index.php/software/123-triguero>.

Modelos más complejos, como el DDSAT(<https://dssat.net>), permiten simular el crecimiento y rendimiento del cultivo ante cambios en un mayor número de variables, por ejemplo, el fraccionamiento de dosis de N. Sin embargo, dichos modelos requieren de un mayor entrenamiento para su uso.

### - Métodos proximales: clorofilómetro y sensores de reflectancia

Los *sensores proximales* constituyen una alternativa práctica y sencilla para el monitoreo del status de N del cultivo. Entre ellos, el Minolta SPAD 502® es uno de los más empleados y permite dicho monitoreo a partir de la determinación de

la intensidad del color verde de la hoja (índice de verdor, IV). Esta asociación se basa en que el N es uno de los principales constituyentes de la clorofila, pigmento responsable de esta coloración.

Por otra parte, existen numerosos sensores remotos capaces de determinar varios índices a partir de la reflectancia espectral del cultivo. Entre ellos, los más utilizados son los que permiten calcular el índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI, según sus siglas en inglés), que depende de la capacidad del cultivo de interceptar (de acuerdo al área foliar) y absorber (según la concentración de clorofila) la radiación.

Tanto el IV, como el NDVI, están afectados por varios factores como el cultivar, el estado de desarrollo, la incidencia de plagas, enfermedades etc. Por ello, es necesario establecer en el lote a monitorear áreas de referencia con suficiencia de N a fin de relativizar las mediciones según la Ec.3:

$$\text{ISN} = \text{IV}_{\text{lote}} / \text{IV}_{\text{ref}} \quad \text{ó} \quad \text{NDVI}_{\text{r}} = \text{NDVI}_{\text{lote}} / \text{NDVI}_{\text{ref}} \quad \text{Ec.3}$$

Donde, ISN es el índice de suficiencia de N, NDVI<sub>r</sub> es el NDVI relativo, IV<sub>lote</sub> y NDVI<sub>lote</sub> son el IV y NDVI del lote problema, respectivamente e IV<sub>ref</sub> y NDVI<sub>ref</sub> representan el IV y NDVI de las franjas con suficiencia de N, respectivamente.

La Figura 4 muestra la relación entre la respuesta a N y el ISN al estado de un nudo (Z31) en el sudeste de Buenos Aires y sur de Santa Fe.

**El diagnóstico del estatus nitrogenado mediante el uso del IV o NDVI requiere del establecimiento de franjas de suficiencia de N en el lote.**

#### Fuente de N

En general, las fuentes de N disponibles en Argentina no presentan diferencias en la eficiencia de uso del N cuando se aplican en estadios iniciales del cultivo, debido a que están rápidamente disponibles para su absorción y manifiestan similar susceptibilidad a sufrir pérdidas del sistema. En este sentido, el principal mecanismo de pérdidas del nutriente durante el ciclo del cultivo es el lavado de nitrato, ante el cual las distintas fuentes se comportan de manera similar. Por el contrario, las fuentes difieren respecto de la susceptibilidad a pérdidas por volatilización de amoníaco, aunque en la región triguera argentina, estas pérdidas no son muy relevantes (<10% de lo aplicado) debido a las bajas temperaturas y, según las zonas, la falta de humedad en el suelo.

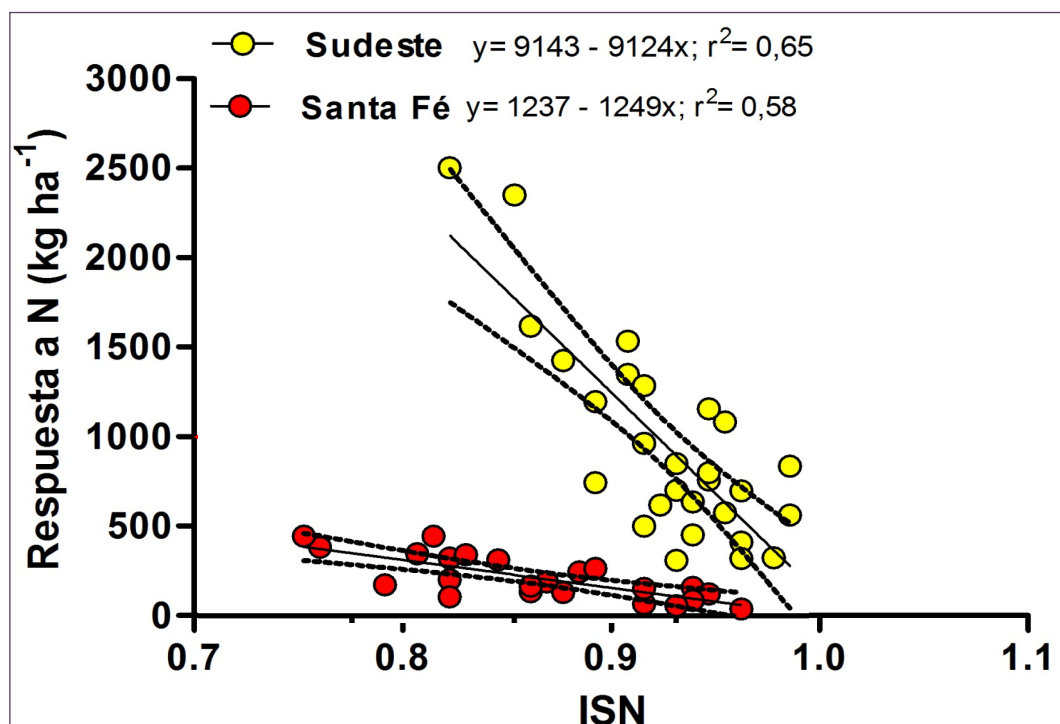


Figura 4. Relación entre la respuesta a N en trigo y el Índice de Suficiencia de Nitrógeno – ISN– en el sudeste de Buenos Aires y sur de Santa Fe. Fuente: Reussi Calvo et al. (2013; 2015).

Como se discute en el apartado de proteína en grano, las aplicaciones que tienen como objetivo el follaje, deben contemplar fuentes que no causen daño por toxicidad.

### Momento de aplicación de N

De modo general, la mayor eficiencia de uso del N aplicado se logra cuando la oferta coincide con la demanda del cultivo. Sin embargo, diversos factores (climáticos, operativos, etc.) condicionan el momento de fertilización. En este sentido, en la mayor parte de las regiones trigueras, la ocurrencia de precipitaciones durante estadios iniciales del cultivo determina el momento de aplicación de N por dos motivos: i) la deficiencia hídrica limita la incorporación del nutriente al suelo y ii) los excesos hídricos incrementan la probabilidad de que ocurran pérdidas, principalmente por lavado. La primera situación es frecuente en gran parte de la región triguera argentina, especialmente hacia el oeste y norte, por lo que las aplicaciones a la siembra han resultado en una eficiencia de uso del N igual o mayor que la de las aplicaciones al macollaje. Por el contrario, en el sudeste de Buenos Aires (subregión IVS), las aplicaciones diferidas al macollaje han resultado en una mayor eficiencia de uso del N.

Las aplicaciones divididas constituyen un caso particular. Estas son más frecuentes cuando se utilizan dosis elevadas de N, para cultivos de altos rendimientos, en particular para siembras tempranas. Así, cuando el objetivo es incrementar el rendimiento, es posible fraccionar la dosis entre siembra y fin de macollaje. Como se discute más adelante, si se pretende aumentar el rendimiento y mejorar el contenido de proteína en grano se deberán realizar aplicaciones tempranas de base y complementar luego entre hoja bandera (Z39) y post-floración (Z60).

### Forma de aplicación de N

Como se indica en el Anexo "Ubicación de fertilizantes junto con la semilla", las fuentes sólidas amoniacales generan problemas de fitotoxicidad a semillas y plántulas. Por ello deben evitarse las aplicaciones de dosis elevadas de dichas fuentes en la línea de siembra. En estos casos, la práctica más común es al voleo, en cobertura total. Por su parte, las fuentes líquidas que contiene UAN se aplican, en general, chorreadas a fin de evitar quemado del follaje.

### Ubicación de fertilizantes con la semilla

*Detalles adicionales y otros cultivos pueden consultarse en Ciampitti, I.A. et al. (2006). Manejo y ubicación del fertilizante junto con la semilla: Efectos fitotóxicos. Archivo Agronómico No. 10. IPNI Cono Sur, Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1084>*

En el cultivo de trigo, la fitotoxicidad de los fertilizantes aplicados a la siembra junto a la semilla varía teniendo en cuenta algunos factores. Un factor de importancia es la textura de los suelos, propiedad que influye en su CIC y su capacidad de retención de humedad.

En la **Figura 5a**, en suelos Argiudoles típicos, se evaluó como fuente nitrogenada la urea, presentando diferentes combinaciones: urea sola, combinada con superfosfato triple (SFT) y con fosfato monoamónico (FMA). En el caso de las últimas dos combinaciones, las dosis de los fertilizantes SFT y FMA fueron constantes, correspondiendo  $33 \text{ kg ha}^{-1}$  SFT y  $55 \text{ kg ha}^{-1}$  FMA. Se debe considerar que el tratamiento con fertilizante FMA adiciona de forma extra,  $5\text{-}6 \text{ kg ha}^{-1}$  de N elemento y en ambos casos, FMA y SFT, incrementan adicionalmente los efectos de salinidad al aumentar la dosis de fertilizante aplicado junto con la semilla.

Las tres combinaciones presentan el mismo efecto de fitotoxicidad sobre el número de plántulas emergidas, teniendo en consideración las prácticas de manejo utilizadas, bajo siembra directa, con condiciones de humedad moderadas (rango 17-27% HA) al momento de la siembra y un distanciamiento entre hileras de 0.175 metros. Dosis de urea entre  $19$  y  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  resultan en pérdidas de 10 y 25% de plántulas a emergencia, respectivamente, cuando la fertilización se realiza junto a la semilla.

En el sudeste de Córdoba, Gudelj et al. (2001), observaron que la urea fue la fuente que mayor fitotoxicidad produjo, aumentando la mortandad con dosis superiores a  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de N elemento o sea  $54 \text{ kg ha}^{-1}$  de urea. Otros autores encontraron que para prevenir la fitotoxicidad, es recomendable agregar no más de  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de N ( $65 \text{ kg ha}^{-1}$  de urea o  $167 \text{ kg ha}^{-1}$  de FDA) en suelos con mayor contenido de MO y texturas medias, mientras que en suelos de textura gruesa y menor contenido de MO no se debería superar los  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  de N ( $26$  a  $33 \text{ kg ha}^{-1}$  de urea o  $67$  a  $83 \text{ kg ha}^{-1}$  de FDA).

Las dosis mencionadas son meramente orientativas, e indican que la dosis límite no puede generalizarse y que la misma aumenta con el contenido de humedad del suelo, arcilla y MO, y disminuye cuando aumenta la distancia entre hileras (Ron y Loewy, 2000). Con respecto a otros fertilizantes, los efectos de FDA serían similares a los de la urea en cuanto a los niveles críticos de N, ya que el  $\text{NH}_4$  del FDA puede generar  $\text{NH}_3$  por la reacción alcalina de este fertilizante en el suelo (pH 8-8.5). Los efectos de superfosfatos y FMA son menores ya que no producen  $\text{NH}_3$ , por lo tanto, sólo generan efecto salino.

## Disponibilidad de N y contenido de proteína en grano

El contenido de proteína en grano es uno de los principales indicadores de calidad del trigo.

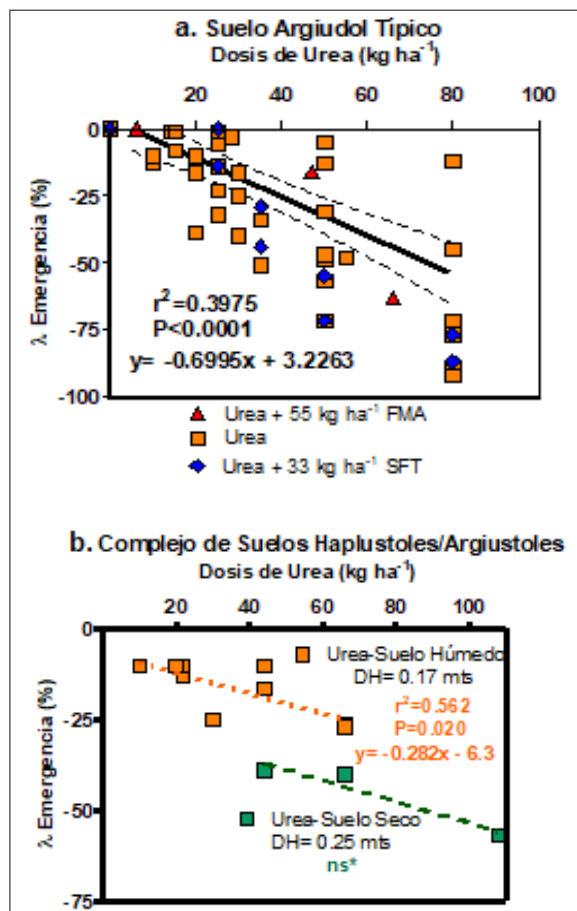


Figura 5. Fitotoxicidad de la urea en el cultivo de trigo dependiendo de los tipos y condición hídrica de suelos y con la combinación de otros tipos de fertilizantes. Elaborado con datos de Baumer et al. (1995/96), Gudelj et al. (2001), Loewy (2000a) y H. Fontanetto (no publicado).

Tabla 3. Requerimientos de N (kg de N en planta para producir una tonelada de grano) para distintos valores de rendimiento y proteína en grano. Adaptado de Abbate y Andrade (2015).

Rendimiento ( $\text{t ha}^{-1}$ )	Proteína (%)				
	9	10	11	12	13
3	19	21	24	27	29
4	20	22	25	27	30
5	20	23	25	28	30
6	21	23	26	28	31
7	21	24	26	29	31

El mismo está afectado por la disponibilidad de N en el suelo, aunque lo hace de un modo complejo (Figura 6). Así, cuando la disponibilidad de N es baja, el agregado incrementa principalmente el rendimiento y no afecta el nivel de proteína o provoca disminuciones debido a un "efecto dilución" (Fase I). Cuando la disponibilidad del nutriente aumenta, aumentan simultáneamente rendimiento y proteína (Fase II); y finalmente, con alta disponibilidad de N, el rendimiento alcanza un *plateau*, mientras que la concentración de proteína continúa aumentando hasta estabilizarse (Fase III).

El cambio en el rendimiento y proteína ante distinta oferta de N afecta los requerimientos del cultivo (Tabla 3). Nótese que para un rendimiento de entre 4 y 6  $\text{t ha}^{-1}$  y 11% de proteína (valor de referencia para la comercialización), el cultivo requiere absorber entre 25 y 26  $\text{kg N t}^{-1}$  de grano, un valor similar al presentado en la Tabla 1. Se destaca también que el requerimiento aumenta con el nivel de rendimiento, pero lo hace mucho

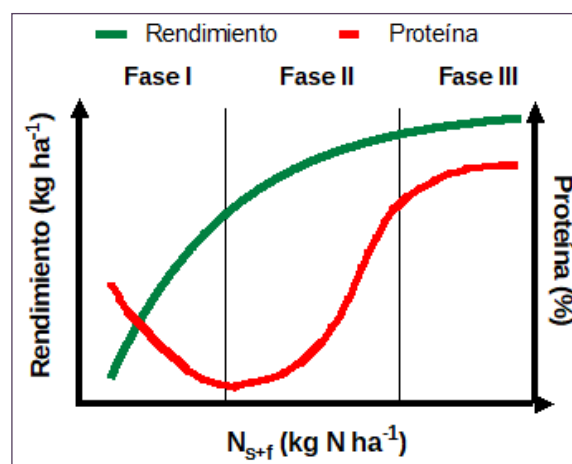
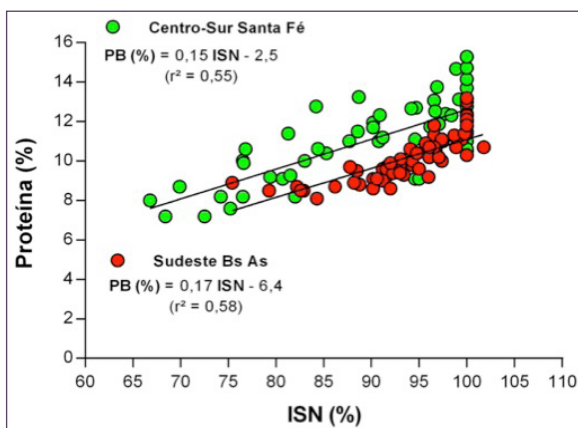


Figura 6. Rendimiento y proteína en grano en función de la cantidad de N disponible en el suelo (s) más el fertilizante (f). Adaptado de Stone y Savin (1999).



más al cambiar el nivel de proteína. De este modo, independientemente del rendimiento, el requerimiento de N supera los 25 kg N t<sup>-1</sup> si se pretende lograr un contenido de proteína superior a 11%.

Según lo descripto, la fertilización nitrogenada de base (a la siembra o al macollaje) debe ser elevada si se pretende incrementar simultáneamente el rendimiento y el contenido de proteína. Esto conlleva, necesariamente, a una menor eficiencia de uso del nutriente debido al mayor riesgo de pérdidas. Una alternativa más eficiente



**Figura 7.** Proteína en grano en función del índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) al estado Z39 determinado con un clorofilómetro. Adaptado de Reussi Calvo et al. (2015) y Orcellet et al. (2017).

consiste en efectuar aplicaciones fraccionadas de N hasta estados avanzados de desarrollo. En el sudeste bonaerense, las aplicaciones de fuentes sólidas hasta hoja bandera resultaron efectivas, aunque, en aplicaciones posteriores (hasta post-antesis), las fuentes líquidas presentan mejor performance.

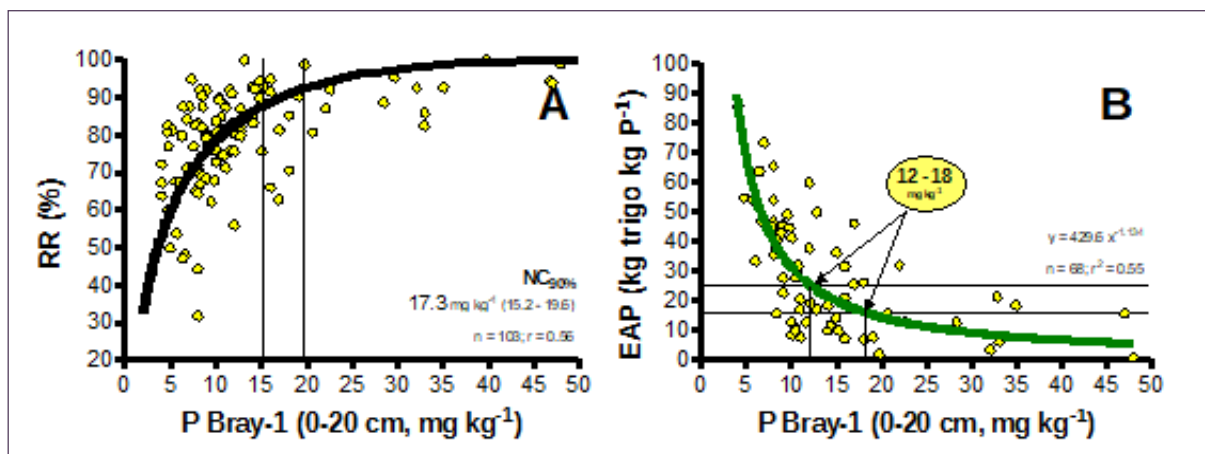
En las aplicaciones de fuentes líquidas en estadios avanzados, la mayor parte del N se absorbe directamente desde la biomasa aérea. En este caso, se deben aplicar fuentes que no causen fitotoxicidad. Las formulaciones de urea (20% N) con bajo contenido de biuret (<0,25%) son las más empleadas. No debe excederse la dosis de 30 kg N ha<sup>-1</sup>.

Como se indicó anteriormente, el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 y los sensores que determinan el NDVI, permiten la estimación rápida y sencilla del estatus nitrogenado del cultivo en estadios avanzados, y resultan útiles para diagnosticar las necesidades de N para corregir el contenido de proteína (Figura 7)

## Fósforo

### Dosis de P

Los métodos de diagnóstico de la fertilidad fosfatada para los cultivos se basan en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial (0-20 cm). En la región pampeana argentina y Uruguay, el análisis recomendado y calibrado es el P extractable Bray-1. La experimentación agronómica



**Figura 8.** Estimación de nivel crítico de P extractable Bray-1 utilizando rendimiento relativo (RR, A) y eficiencia agronómica de la respuesta a P (EAP, B). En A, la franja vertical gris indica el intervalo de confianza (95%) para el nivel crítico estimado según el método ALCC modificado (Correndo et al., 2016). En B, la franja horizontal verde indica el percentil central (P25-P75) de la relación histórica de precios de P en trigo (16 a 25 kg trigo kg P<sup>-1</sup>). Datos correspondientes a 103 ensayos de fertilización fosfatada en la región pampeana (1998-2014) de distintos autores. Fuente: Correndo y García (inédito).



relacionó el rendimiento del cultivo con el nivel de P Bray-1 y ha permitido establecer umbrales críticos por debajo de los cuáles los cultivos manifiestan alta probabilidad de respuesta a la fertilización.

Para la región pampeana argentina, se observan relaciones significativas entre diferentes variables asociadas al rendimiento de trigo y el nivel de P Bray-1. Por un lado, bajo un criterio productivo de lograr el 90% del rendimiento relativo (sin limitaciones de P), el rango crítico resulta entre 15.2 y 19.6 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 8A). Por otro lado, bajo un criterio económico de decisión, para relaciones de precios entre 16 y 25 kg de trigo por kg de P (variación normal histórica), los niveles críticos por debajo de los cuales existe una alta probabilidad de respuesta rentable a la aplicación de fertilizantes fosfatados, se ubican entre 12 y 18 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 8B).

De este modo, la dosis recomendada P depende del nivel de P Bray, del rendimiento esperado (asociado a la reposición del nutriente que extraerá el cultivo), de la relación de precios entre el trigo y el fertilizante y del criterio de manejo del nivel P del suelo. Respecto a esto último, existen dos criterios básicos: el de *suficiencia* y el de *reconstrucción y mantenimiento*. El criterio de *suficiencia* pretende satisfacer los requerimientos del cultivo, mientras que el de *reconstrucción y mantenimiento* implica establecer un nivel deseado de P en el suelo, generalmente considerado a partir del nivel necesario para obtener un rendimiento objetivo. Si se parte desde un análisis de suelo menor al objetivo se debe "reconstruir" el nivel de P extractable, para luego "mantenerlo" mediante la reposición del P que se exporta en grano. Resulta evidente que pueden plantearse

alternativas intermedias a estas dos líneas, dependiendo de la concentración de P en el suelo y del esquema productivo (lote propio o arrendado, situación financiera de la empresa, etc.)

*Para "reconstruir" el nivel de P Bray del suelo en 1 mg kg<sup>-1</sup> se deben aplicar entre 2 y 5 kg de P por encima de la exportación del cultivo, dependiendo del tipo de suelo. Este valor es variable, lo que exige un monitoreo mediante análisis de suelo. Para la región pampeana central, Sucunza et al. (2018) reportaron incrementos de aproximadamente 3 ppm de P Bray con aplicaciones de 10 kg P ha<sup>-1</sup> por arriba de la extracción en grano de los cultivos.*

A modo de ejemplo, la **Tabla 4** muestra la recomendación de fertilización fosfatada para trigo en el sudeste bonaerense, de acuerdo al nivel de P Bray-1 y el rendimiento esperado (Echeverría y García, 1998). Estas recomendaciones, generadas a partir de los resultados de los ensayos realizados en el área, se basan en el criterio de suficiencia e incluyen, en forma parcial, el criterio de reconstrucción para los niveles muy bajos de P extractable, y de mantenimiento para niveles superiores a los 16 mg kg<sup>-1</sup>.

### Fuente de P

Varios trabajos realizados en la región coinciden que no existen diferencias en la eficiencia de uso de P entre las fuentes más utilizadas, siempre que se igualen las dosis de los demás nutrientes que componen el fertilizante. Esto obedece a que las mismas presentan similar solubilidad. La roca fosfórica es la excepción, debido a que es menos soluble, por lo que debe ser aplicada con anticipación a la siembra del cultivo. Actualmente, se

**Tabla 4.** Recomendaciones de fertilización fosfatada para trigo según el nivel de P Bray del suelo y el rendimiento esperado del cultivo (Echeverría y García, 1998).

Rendimiento	Concentración de P disponible en el suelo (mg kg <sup>-1</sup> )						
	< 5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-16	16-20
kg ha <sup>-1</sup>	----- kg P ha <sup>-1</sup> -----						
2000	20	15	13	11	9	7	0
3000	23	19	17	15	13	11	0
4000	27	22	21	18	17	14	10
5000	31	26	24	22	20	18	14
6000	34	30	28	26	24	22	17
7000	38	33	31	29	28	26	21

dispone en el mercado de mezclas químicas y físicas que incluyen también S y otros nutrientes junto al P. Asimismo, en los últimos años han surgido nuevas formulaciones de P en formas sólidas y líquidas, que se presentan como alternativas de interés considerando aspectos logísticos y la posibilidad de sumar otros nutrientes en una misma fuente y aplicación. Estas fuentes podrían resultar en mejoras en la eficiencia de uso de P bajo ciertas condiciones de suelo y cultivo.

*El contenido de P de los fertilizantes puede expresarse en términos de grado equivalente (como  $P_2O_5$ ), aunque debe expresarse como grado (P elemento). La conversión es la siguiente:*

$$\% P = \% P_2O_5 * 0.43$$

$$\% P_2O_5 = \% P * 2.29$$

### Forma y momento de aplicación de P

El P es un nutriente de baja movilidad en el suelo, por lo que las aplicaciones localizadas realizadas junto a la siembra tienden a presentar una mayor eficiencia de uso que aplicaciones en cobertura ("al voleo"). Esta diferencia entre formas de aplicación se incrementa en suelos muy deficientes de P ( $P_{Bray-1} < 10 \text{ mg kg}^{-1}$ ) o suelos que presentan alta capacidad de fijación del nutriente (poco comunes en las regiones trigueras de Argentina). Por el contrario, las aplicaciones "al voleo" alcanzan eficiencias de uso de P similares a las aplicaciones en bandas, cuando las mismas se realizan bajo sistema de siembra directa estabilizados y con anticipación a la siembra del cultivo. Esto puede ser atribuido a que, bajo siembra directa, hay un incremento de la actividad de las raíces y microorganismos en los primeros centímetros de suelo que favorece la disponibilidad del nutriente. Además, la eficiencia de la aplicación al voleo tiende a ser similar a la localizada cuando la dosis de P es mayor a  $20\text{-}25 \text{ kg P ha}^{-1}$ , cuando las lluvias post-aplicación son mayores a 50 mm y cuando la cobertura del suelo por residuos de cultivos no es excesiva.

### Azufre

El aporte de S al cultivo depende de los procesos de mineralización-inmovilización del nutriente en el suelo, debido a que más del 95% se encuentra en formas orgánicas. Por ello, las deficiencias de S se observan con mayor frecuencia en suelos de textura gruesa, con bajo contenido original de materia orgánica o donde dicho nivel

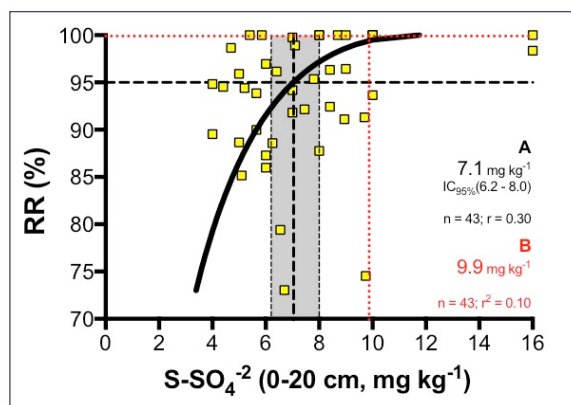
ha disminuido por un prolongado uso agrícola. Información surgida de redes de ensayos realizadas en trigo en la Región Pampeana indica una alta frecuencia y magnitud de respuesta en el sur y centro de Santa Fe y en el centro-oeste y norte de Buenos Aires. En el sudeste de Buenos Aires, la respuesta es menos frecuente, aunque se ha observado un aumento en los últimos años, especialmente en lotes con más de 8-10 años de agricultura.

*Suelos de textura gruesa, bajo siembra directa, con bajo contenido de materia orgánica y/o prolongada historia agrícola son los escenarios de mayor probabilidad de respuesta a la fertilización con S*

### Dosis de S

#### - Indicadores de Suelo

La determinación del contenido de S como sulfato ( $S\text{-}SO_4^{-2}$ ) en muestras de suelo (0 a 20 ó 0 a 60 cm) tomadas a la siembra del cultivo es la metodología más difundida para evaluar la disponibilidad del nutriente. Considerando una profundidad de muestreo de 0-20 cm, se determinó un rango crítico de  $S\text{-}SO_4^{-2}$  de entre  $6.2$  y  $8.0 \text{ mg kg}^{-1}$  para 43 experimentos realizados en la región pampeana entre 2000 y 2015 (Figura 9). Para una red de 30 ensayos realizada en la región pampea-



**Figura 9.** Relación entre el rendimiento relativo (RR) de trigo y el nivel de  $S\text{-}SO_4^{-2}$  del suelo en 0-20 cm. La barra vertical gris indica un rango crítico de  $6.2$  a  $8.0 \text{ mg kg}^{-1}$ , según el método del arcoseno-logaritmo -ALCC- modificado (A) (Correndo y col., 2016). Las líneas punteadas rojas indican un nivel crítico de  $9.9 \text{ mg kg}^{-1}$  para obtener 99.9% de RR, según el método estadístico de Cate-Nelson (B) (Cate y Nelson, 1971). Información de 43 ensayos realizados en el Sur de Santa Fe y Sur de Córdoba entre las campañas 2000/01 y 2015/16.

na se ha sugerido un umbral de 36 kg de S-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> por hectárea para determinaciones realizadas en el estrato 0-60 cm (Echeverría et al., 2011).

Sin embargo, el análisis de S-SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en suelo no ha mostrado resultados completamente satisfactorios. Esto obedece, entre otras razones, a la dinámica de mineralización del SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en el suelo, a la presencia en horizontes sub-superficiales, a los aportes por agua de napa, y a características propias de la determinación del SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en laboratorio. Esta situación ha propiciado que las recomendaciones de S intenten cubrir los requerimientos de los cultivos, con dosis que varían entre 5 y 20 kg de S por ha.

El desarrollo de herramientas más precisas para el diagnóstico de la fertilidad azufrada es el objetivo de numerosas investigaciones en Argentina. Esto permitirá aplicar estrategias más adecuadas a las actuales, tanto en términos económicos como ambientales.

*La presencia de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en horizontes sub-superficiales o en agua de napa y características propias de la determinación del SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en laboratorio dificultan el diagnóstico del estatus azufrado mediante análisis de suelo*

### - Indicadores de Planta

Debido a las inconsistencias del diagnóstico mediante el análisis de muestras de suelo, la determinación de la concentración de S y la relación N:S en biomasa aérea y en grano se proponen como herramientas complementarias. Así, se ha determinado que el umbral de 16:1 para la relación N:S en biomasa aérea permitió una buena caracterización del estatus azufrado, en muestreos realizados desde inicio de macollaje hasta fin de encañazón. Para el análisis de grano se propone el uso conjunto de la concentración de S total y de la relación N:S de los mismos. Reussi Calvo et al. (2011) informaron que granos provenientes de cultivos que manifestaron respuesta a S tuvieron una concentración menor a 1.5 g S kg<sup>-1</sup> y con una relación N:S mayor a 13:1.

### Fuente de S

Debido a que la forma de S es SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en todos los casos y a sus características químicas y físicas, el sulfato de amonio, sulfato de magnesio y potasio, sulfato de potasio, tiosulfato de amonio y super-

fosfato simple presentan similares eficiencias de uso. Por su parte, el sulfato de calcio (yeso) tiene menor solubilidad, por lo que las formulaciones deben presentar partículas de tamaño pequeño para permitir un buen contacto con el suelo y facilitar su disolución. Las evaluaciones a campo de estas fuentes sulfatadas han mostrado eficiencias de uso de S similares.

Se destaca que las fuentes de S se presentan, comúnmente, en mezclas con fertilizantes que incluyen N, P u otros nutrientes. Dichas mezclas pueden ser físicas, que surgen de la combinación física de dos o más fertilizantes simples, o pueden ser "fertilizantes compuestos" que se obtienen por reacción química (y en algunos casos por compactación física) de diferentes compuestos. En este último caso, cada gránulo resultante contiene la misma concentración de nutrientes.

### Forma y momento de aplicación de S

Las aplicaciones de fertilizantes azufrados pueden realizarse indistintamente al voleo o en bandas ya que el sulfato tiene buena movilidad en el suelo. El S elemental debe aplicarse con anticipación a la siembra debido a que debe ser oxidado a SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> para que pueda ser absorbido por el cultivo. Cuando el S se aplica como componente de una mezcla, los demás nutrientes pueden condicionar la forma y momento de aplicación correctos.

### Azufre y calidad del grano

El S es un componente relevante de las proteínas del grano de trigo. Su deficiencia puede afectar las propiedades funcionales de las masas, siendo estas más fuertes, menos extensibles y generando un menor volumen de pan. Aunque los umbrales no han sido aún verificados en Argentina, se sugiere que trigos de adecuada aptitud panadera deberían presentar una concentración de S superior a 0.12% y relación N:S mayor a 17:1.

### Potasio

### Dosis de K

La química del K del suelo es relativamente simple en comparación con otros nutrientes como N o P, ya que el K no forma compuestos orgánicos. En este sentido, el K intercambiable

( $K_{int}$ ), adsorbido a los coloides del suelo, es un adecuado estimador de la disponibilidad para los cultivos, ya que abastece rápidamente a la solución del suelo. Los suelos de la región pampeana argentina presentan, originalmente, adecuada disponibilidad de K para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Por esto, el estudio de metodologías de diagnóstico, umbrales de suficiencia y aspectos referidos a las MPM del nutriente no han recibido mucha atención. Sin embargo, el incremento en la extracción del nutriente a partir de una mayor producción de los cultivos ha provocado un empobrecimiento de los suelos.

Un relevamiento reciente realizado por Sainz Rozas et al. (2013) aporta información sobre los cambios en los niveles de  $K_{int}$  en la Región Pampeana y extra Pampeana y advierte sobre zonas con mayor probabilidad de deficiencias a futuro. Si bien en la mayor parte de la Región los niveles son muy altos, surgen zonas específicas como la Provincia de Entre Ríos, el oeste de Santa Fe y noreste de Buenos Aires donde el nivel es sensiblemente menor y se pueden esperar las primeras deficiencias del nutriente en el futuro.

*En la Provincia de Entre Ríos, el oeste de Santa Fe y noreste de Buenos Aires, la disponibilidad de K intercambiable es sensiblemente menor al resto de las regiones trigueras y advierten sobre la posible futura ocurrencia de deficiencias del nutriente.*

Hasta el momento, no se han reportado situaciones de deficiencias severas en cultivos extensivos en Argentina. En Uruguay, estudios recientes han indicado disminuciones importantes del  $K_{int}$

así como deficiencias en varios suelos agrícolas (Barbazán et al., 2011). La **Tabla 5** muestra categorías según el análisis de K extractable y las recomendaciones de fertilización potásica para trigo para el sur de Brasil y el medio-oeste de EE.UU.

### Fuente de K

Los fertilizantes potásicos son altamente solubles y no presentan diferencias agronómicas, más allá de los nutrientes acompañantes en la formulación (ver Anexo). En general, presentan un índice de salinidad relativamente elevado que puede provocar daños a semillas y plántulas si se aplican en la línea de siembra.

### Forma y Momento de aplicación de K

En general, las aplicaciones de K pueden realizarse "al voleo" en pre-siembra o siembra ya que el potencial de pérdidas por lavado es despreciable. Pueden presentarse excepciones en suelos arenosos o ambientes de elevadas precipitaciones, donde las aplicaciones en bandas a la siembra sean más eficientes.

De manera similar al P, la aplicación de K en dosis que exceden lo extraído por los cultivos manifiesta residualidad, lo que permite definir estrategias de fertilización a la rotación de cultivos.

### Calcio y Magnesio

En general, no es común que se observen deficiencias de Ca y Mg en las regiones donde se cultiva el trigo en Argentina. Cuando ocurren, se asocian a problemas de acidificación del suelo.

**Tabla 5.** Categorías de K intercambiable en suelos y recomendaciones de fertilización potásica para trigo según la Comisión de Fertilidad de Suelos de Rio Grande do Sul/Santa Catarina (Brasil) y las universidades estatales de Iowa y Kansas (EE.UU.).

Institución		Categorías de $K_{int}$ y Dosis de K recomendadas				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Comisión Fertilidad de Suelos RS/SC <sup>1</sup>	Nivel (mg kg <sup>-1</sup> )	< 40	41-60	61-80	81-120	> 120
	Dosis de K (kg ha <sup>-1</sup> )	108-83	58	33	17	< 17
Iowa State University <sup>2</sup>	Nivel (mg kg <sup>-1</sup> )	< 90	91-130	131-170	171-200	> 200
	Dosis de K (kg ha <sup>-1</sup> )	58	33	12	0	0
Kansas State University <sup>3</sup>	Nivel (mg kg <sup>-1</sup> )	< 40	41-80	81-120	121-160	> 160
	Dosis de K (kg ha <sup>-1</sup> )	50	33	17-12	0-12	0

<sup>1</sup> Extractante Mehlich I; <sup>2</sup> Extractante acetato de amonio o Mehlich 3, subsuelo bajo en K; <sup>3</sup> Extractante acetato de amonio.



Así, resulta difícil separar las deficiencias de Ca o Mg, respecto a la toxicidad aluminio ( $\text{Al}^{+3}$ ) o manganeso ( $\text{Mn}^{+2}$ ). Es frecuente que la deficiencia de Ca no se observe, debido a que los efectos de la acidez del suelo se manifiestan antes. La deficiencia de Mg puede detectarse con niveles de Mg intercambiable menores a  $50 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Las fuentes de Mg disponibles en el mercado son la dolomita (7-21% Mg; 21-45% Ca), el sulfato de magnesio (10-19% Mg; 13-26% S), el sulfato doble de Mg y K (11% Mg; 22% S; 18% K) y el nitrato de magnesio (6-10% Mg; 7% N).

### Micronutrientes

El cloro (Cl) ha sido uno de los micronutrientes más estudiados en trigo. Además de su rol en el metabolismo de la planta, las aplicaciones de Cl han resultado en tolerancia a enfermedades como piedín, royas, y manchas foliares, entre otras. Las respuestas en rendimiento observadas en la región pampeana argentina varían entre 5 y 10%, y se han asociado con niveles de disponibilidad de Cl en suelos menores de  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  (Melgar et al., 2001; Díaz Zorita et al., 2004; García, 2008; Ventimiglia et al., 2008). Asimismo, se han reportado valores críticos de 0.12% para la concentración de Cl en hojas superiores al estado de pre-emergencia floral (Z40). En caso de diagnosticarse deficiencias, las dosis recomendadas varían entre 10 y  $25 \text{ kg ha}^{-1}$  de Cl. No se han encontrado diferencias entre las distintas fuentes de Cl y se han observado resultados similares en aplicaciones al voleo en pre-siembra o durante el macollaje. Ver **Anexo** por fertilizantes disponibles en el mercado argentino.

En cuanto a otros micronutrientes, en la región pampeana se han reportado respuestas a boro en Alberti (Buenos Aires) (Klein, 2003). En la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, se observaron respuestas significativas a aplicaciones conjuntas B, Cu y Zn en 7 sitio-año de los 43 casos (sitios-año) evaluados con trigo entre 2000 y 2015. Con la intensificación de la agricultura y rendimientos progresivamente más elevados, es altamente probable que se manifiesten con mayor frecuencia las deficiencias de estos nutrientes.

### Consideraciones Finales

El desarrollo y la adopción de determinadas metodologías de diagnóstico nutricional se encuentran estrechamente relacionados a las

condiciones específicas de cada sistema de producción en el cual se inserta el cultivo de trigo. El análisis de suelos es la herramienta más comúnmente utilizada con fines de diagnóstico, aunque su adopción como práctica de manejo es aun baja en la región. En determinadas situaciones es necesario complementarlo o utilizar otras alternativas (e.g., calculadoras de requerimientos, análisis de plantas, modelos de simulación). Las tecnologías actuales de sensores locales y remotos, imágenes satelitales, mapas de rendimiento, mapas de suelos y topográficos, son de gran utilidad para lograr una mejor definición de ambientes contrastantes. Obviamente, los costos y recursos que involucran el desarrollo e implementación de cada una de estas tecnologías pueden ser una limitante.

Por otro lado, más allá de contar con alternativas sofisticadas, no debemos perder el enfoque de un punto esencial: "Conocer la realidad con la que trabajamos". En la medida que la información generada por una metodología es representativa de lo que realmente sucede con nuestros suelos y cultivos, a nivel productivo permite mejorar los diagnósticos y recomendaciones de nutrientes en términos de fuente, dosis, momento y forma de aplicación, con los consecuentes efectos positivos sobre los niveles superiores del sistema: ambiental, económico y social.

### Bibliografía

- Abbate P.A. 2015. Ecofisiología y manejo del cultivo de trigo. En: Divito G. y F.O. García (ed.). 2017. Manual del Cultivo de Trigo. Pp. 33-52. International Plant Nutrition Institute. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 224 p. ISBN 978-987-46277-3-5. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1320>
- Abbate P.A. y F.H. Andrade. 2015. Los nutrientes del suelo y la determinación del rendimiento de los cultivos de granos. Pp155-185. En: F.O. García y H.E. Echeverría (Eds.), Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. 2ª ed. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Andrade, F.H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crop Res., 41: 1-12.
- Barbazán M., A. Del Pino, J. Bordoli, A. Califra, S. Mazzilli, O. Ernst. 2011. La problemática del K en Uruguay: situación actual y perspectiva de corto y mediano plazo. II Simposio Nacional de Agricultura de secano v1. P 21-33. Editorial Hemisferio Sur, Montevideo.
- Barbieri P.A., H.E. Echeverría y H.R. Sainz Rozas. 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense.

- Ciencia del Suelo 27(1):115-125.
- Correndo A., Boxler, M., García F.O.** 2015. ¿Qué nos dicen los números de la reposición de nutrientes en el largo plazo? Simposio de Fertilidad. 18 y 19 de Mayo, Rosario, Santa Fé, Argentina. 84-94.
- Correndo, A.A., F.H. Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti, y F.O. García.** 2016. Método alternativo para estimar niveles críticos de nutrientes. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Ordenamiento territorial: un desafío para la ciencia del suelo. Junio 27-Julio 1, 2016. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. AACs.
- Díaz Zorita, M., G. Duarte y M. Barraco.** 2004. Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy Pampas region, Argentina. Agron. J. 96:839-844.
- Domínguez, G. F., G.A. Studdert, y H.E. Echeverría.** 2006. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. Pp: 207-229. En: F.O. García y H.E. Echeverría (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría H.E. y F.O. García.** 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. 2ª ed. 904 p. Buenos Aires. Ediciones INTA.
- Echeverría, H.E y F.O. García.** 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico 149. EEA INTA Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Echeverría, H.E y G.A. Studdert.** 2001. Predicción del contenido de proteína en grano de trigo (*Triticum aestivum* L) mediante el índice de verdor de la hoja. Ciencia del Suelo 19(1):67-74.
- Echeverría, H.E, Calviño P. y M. Redolatti.** 2001. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada y fosfatada bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. Jornada de Actualización Profesional en el Cultivo de Trigo, 18. Mar del Plata, Abril 2001. EEA INTA Balcarce-FCA Balcarce-CIAM. Mar del Plata, Argentina.
- Echeverría, H.E, N.I. Reussi Calvo, A. Pagani, y L. Fernández.** 2011. Métodos de diagnóstico de deficiencia de azufre en los cultivos de trigo, soja de segunda y maíz. Simposio de Fertilidad. 18 y 19 de Mayo, Rosario, Santa Fé, Argentina. 98-107.
- Falotico J, Studdert G, Echeverría HE.** 1999. Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional. Ciencia del Suelo. 17:9-20.
- García F.** 2008. Cloro en trigo: Resultados de las experiencias en la región pampeana argentina: Años 2001 a 2006. Informaciones Agronómicas 38:17-21.
- García F.O; M. Boxler; J. Minteguiaga; R. Pozzi; L. Firpo; I. Ciampitti; A. Correndo; F. Bauschen; A. Berardo y N. Reussi Calvo.** 2010. La Red de Nutrición de la Región Crea Sur de Santa Fe: Resultados y conclusiones de los primeros diez años 200-2009. 2a. ed. AACREA. Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1513-07-9. 64 pag.
- González Montaner, J., G. Maddonni, N. Mailland y M. Porsborg.** 1991. Optimización de la respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo de trigo a partir de un modelo de decisión para la Subregión IV (Sudeste de la Provincia de Buenos Aires). Ciencia del Suelo 9:41-51.
- González Montaner, J., M. Di Nápoli, P. Calviño, N. Mailland, M. Posborg, F. Dodorico y J. Andenoché.** 2003. Nitrógeno en trigo. Revista de los CREA. 272:56-59.
- IPNI.** 2013. 4R de la Nutrición de Plantas: Un Manual para Mejorar el Manejo de la Nutrición de Plantas. Bruulsema TW; P. Fixen & G. Sulewski (Eds.). 1ra Ed. Acassuso. International Plant Nutrition Institute. 140 pp.
- Klein, R.** 2003. Experiencias en fertilización balanceada de trigo/soja en Alberti (Buenos Aires). Informaciones Agronómicas del Cono Sur 17:1-6.
- Melgar, R., M. Camozzi, M. Torres Duggan y J. Lavandera.** 2001. Más vale prevenir: Cloro y potasio. Fertilizar 23:30-33.
- Orcellet, J.M., D. Perez, N.I. Reussi Calvo, H. Sainz Rozas, L. Tornotti y J. Calcha.** 2017. ¿Podemos diagnosticar nitrógeno durante el ciclo del trigo en el norte de la región pampeana? Simposio de Fertilidad. 17 y 18 de Mayo, Rosario, Santa Fé, Argentina.
- Reussi Calvo, N.I., Echeverría y H.R. Sainz Rozas.** 2011. Diagnosing sulphur deficiency in spring red wheat: plant analysis. Journal of Plant Nutrition 34: 573-589.
- Reussi Calvo, N.I., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría y A. Berardo.** 2013. Contribution of anaerobiosis incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. Agronomy Journal 105: 321-328.
- Reussi Calvo, N.I., H. Sainz Rozas, H.E. Echeverría y N. Diovisalvi.** 2015. Using canopy indices to quantify the economic optimum nitrogen rate in spring wheat. Agronomy Journal 107: 459-465.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverría, H. E., Barbieri, P. A., Angelini, H. P., Larrea, G. E., G.N. Ferraris y Barraco, M. R.** 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Actas Simposio Fertilidad 2013. Nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable. IPNI Cono Sur-Fertilizar AC. Pp 62-72
- Satorre E., F. Menéndez y G. Tinghitella.** 2005. El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio "Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente". Rosario, 27-28 Abril. INPOFOS Cono Sur-Fertilizar A.C. pp. 3-11.
- Stone, P.J., y R. Savin.** 1999. Grain quality and its physiological determinants. En Wheat: ecology and physiology of yield determination, 85-120. E H Satorre, Gustavo A Slafer.
- Sucunza F, F.H. Gutiérrez-Boem, F.O. García, M. Boxler, y G. Rubio.** 2018. El balance de fósforo del suelo determina los cambios en el nivel de fósforo extraíble. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 30:23-29. IPNI. Buenos Aires, Argentina. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1321>
- Ventimiglia, L., L. Torrens Baudrix y J. Camarasa.** 2008. Fertilización con cloro en el cultivo de trigo: Efecto de la dosis y respuesta varietal. Informaciones Agronómicas 38:22-24. IPNI. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. ◀

# Maíces tempranos, tardíos o de segunda: ¿todos iguales?

Gabriel Espósito, Cecilia Cerliani y Rafael Naville

Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto  
gesposito@ayv.unrc.edu.ar

## Introducción

El maíz es un cultivo con marcada respuesta productiva a la oferta hídrica y nutricional, posee una gran producción de biomasa y un elevado índice de cosecha que le permite alcanzar rendimiento en grano superiores a las 20 t ha<sup>-1</sup> (Espósito et al., 2017).

En la región pampeana de Argentina, el maíz cumple un importante rol como cultivo forrajero, como grano o silaje de planta entera. Por otro lado, esta región presenta condiciones ambientales propicias para este cultivo en un periodo comprendido entre principios de septiembre y fines de abril, lo cual permite ubicar el periodo de desarrollo del mismo en siembras tempranas (septiembre - octubre), tardías (diciembre) o realizar un doble cultivo donde el maíz ocupa el periodo estival con siembra en diciembre, maíz de segunda (Espósito et al., 2015).

Esta versatilidad en el periodo de crecimiento ofrece diferentes alternativas para ubicar el periodo crítico para la definición del rendimiento del cultivo (alrededor de la floración) según la disponibilidad ambiental de los principales recursos limitantes de la producción, agua, nutrientes y luz solar. De este modo una siembra temprana ubicará la floración hacia fin de diciembre mientras que la siembra tardía o de segunda lo hará en el mes de febrero.

En los últimos años la siembra tardía de maíz ha crecido muy notablemente en superficie, datos de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires han estimado para la campaña 2017/18 una proporción del total de siembra de maíz en Argentina del 54% y 46% para el maíz temprano y tardío, respectivamente. Las condiciones hídricas de la última década han impulsado esta decisión al presentarse frecuentemente balances hídricos más favorables en febrero que en diciembre, aunque con excepciones. También ha crecido la siembra de maíz de segunda sobre trigo de cosecha o maíz tardío sobre cultivos de servicios (centenos y vicia, principalmente).

Estas diferencias en la fecha de siembra de

maíz y en la rotación de cultivos indica la necesidad de revisar las estrategias de fertilización del maíz en la región pampeana argentina.

## Materiales y métodos

En este trabajo se presenta un resumen de los resultados encontrados en diferentes experimentos realizados en Argentina y/o en otros países.

Como referencia general el cultivo de maíz presenta deficiencias de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) y zinc (Zn) en sintonía con la disponibilidad edáfica de estos nutrientes. Cabe mencionar que a modo de síntesis una revisión de estudios realizados en Argentina permitió interpretar que la eficiencia agronómica (EA) de nutrientes (aumento de rendimiento por unidad de nutriente aplicado) fue de 27,5 - 34,3 - 41,5 kg kg<sup>-1</sup> para N-P-S, respectivamente, datos recolectados sobre una base experimental de 501, 267 y 203 experimentos de campo evaluados en N-P-S (Espósito et al., 2014a). En relación al Zn, Espósito et al. (2014) encontraron que la EA fue de 464 kg kg<sup>-1</sup> en promedio sobre 11 experimentos. Por estos resultados la discusión sobre las diferencias de fertilización entre maíces tempranos, tardíos o de segunda se realizará sobre los cuatro principales nutrientes, N, P, S y Zn.

## Resultados y discusión

### Fósforo

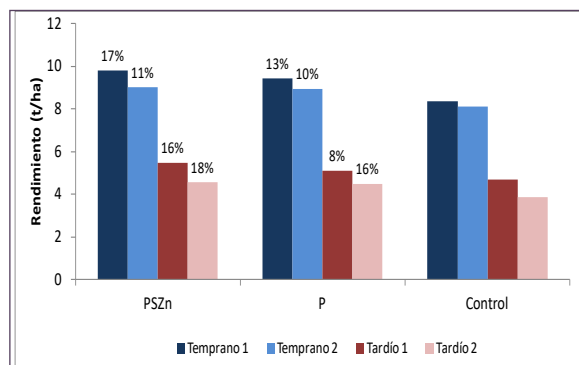
Entre los principales cultivos de grano, el maíz es muy demandante de P, tiene una necesidad de absorción de 4 kg t<sup>-1</sup> con un índice de cosecha del 75%. Para el manejo de este nutriente como de aquellos de baja movilidad en el suelo se utilizan los "criterios de fertilización": a) deterioro (no se fertiliza), b) reposición (se fertiliza con la dosis de extracción en granos según rendimiento obtenido), c) suficiencia (se fertiliza para alcanzar el nivel crítico de 15 mg kg<sup>-1</sup> según el P equivalente, cantidad de fertilizante necesaria para incrementar en 1 mg kg<sup>-1</sup> el P disponible

del suelo), d) recuperación, dosis superior a la de reposición, cuando es recuperación en un año es el equivalente a la suma de reposición y suficiencia, y e) optimización económica, a partir de una función de respuesta obtener la dosis que maximiza el retorno económico al fertilizante utilizado.

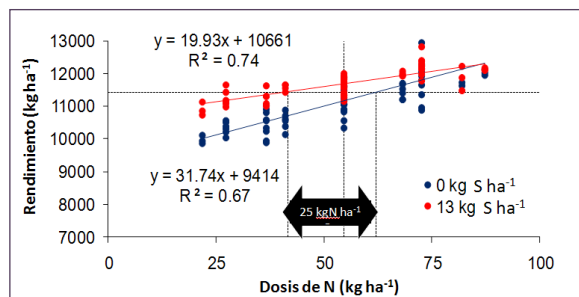
Para el cálculo de la dosis de P a aplicar se recomienda que como mínimo se utilice el criterio de suficiencia y para éste las diferencias entre tipos de maíz no incidirían en la dosis a utilizar, puesto que la respuesta al P no depende fundamentalmente del rendimiento de maíz sino de que el suelo se encuentre por debajo del valor crítico de P disponible. En la **Figura 1** se puede observar que independientemente de la fecha de siembra de maíz y del rendimiento alcanzado la respuesta al agregado de P fue consistente en un suelo con menos del valor crítico.

### Azufre

El azufre es un nutriente vegetal ligado a la mineralización de la materia orgánica del suelo. La forma de absorción del S es mediante la disponibilidad de sulfatos disponibles en la solu-



**Figura 1.** Rendimiento de maíz en ensayos de fertilización con P en el sur de Córdoba, en siembras tempranas (25/09) y tardías (12/12)



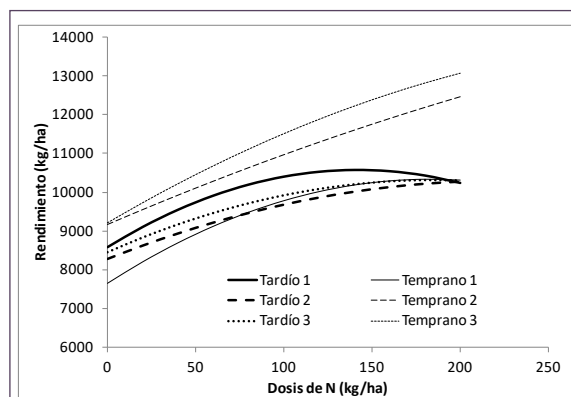
**Figura 2.** Rendimiento de maíz según la dosis de N y S aplicados conjuntamente (Castillo et al., 2006).

ción. Las técnicas de determinación de sulfatos, generalizada hasta el presente en la Argentina es la turbidimetría. Esta técnica no ha evidenciado suficiente precisión para realizar correctos diagnósticos, por ello es difícil establecer niveles de S del suelo que se asocien con la respuesta a la fertilización. No obstante, ha sido encontrado en maíz, trigo y soja que la adición de 15 kg ha<sup>-1</sup> de S ha incrementado los rendimientos de los cultivos en la mayoría de los experimentos evaluados.

Además, en maíz, Castillo et al. (2006) encontraron interacción entre la fertilización nitrogenada y azufrada de acuerdo a las tendencias presentadas en la **Figura 2**, donde se puede apreciar en la misma el agregado de 13 kg S ha<sup>-1</sup>, permitió disminuir la dosis de N en 25 kg ha<sup>-1</sup> manteniendo similar producción de granos.

### Zinc

El Zn es el micronutriente que más frecuentemente se encuentra como limitante en los suelos de región pampeana para la producción vegetal. Barbieri et al. (2017) encontraron que el nivel crítico de Zn para maíz es de 1 mg kg<sup>-1</sup> y que éste es independiente del rendimiento del maíz, es decir que cabría esperar respuesta al agregado de Zn en altos o bajos rendimiento siempre y cuando la cantidad de Zn disponible del suelo fuese inferior al umbral crítico. Es necesaria la adición de dosis superiores a 1 kg ha<sup>-1</sup> de Zn, el cual puede aplicarse al momento de la siembra conjuntamente con el P y el S, como curasemillas, en fertilización foliar o conjuntamente con el uso de UAN (Espósito et al., 2014b).



**Figura 3.** Función de producción de maíz según dosis de N aplicado, en siembras tempranas y tardías en tres ensayos realizados en el sur de Córdoba.



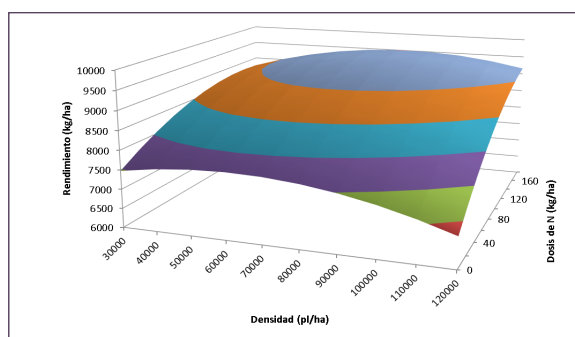
Las aplicaciones conjuntas de P y Zn permiten mejorar la eficiencia agronómica (EA) del uso de P de 42,5 a 66,5 kg grano por kg de P, es decir un 56,7% de incremento.

Estas consideraciones del manejo del Zn indicarían que, independientemente del rendimiento y del destino final del maíz, el manejo nutricional dependerá solamente de su biodisponibilidad edáfica. Cabe indicar que muestras serológicas de bovinos del sur de Córdoba evidencian valores medios entre 0,58 a 0,65 mg kg<sup>-1</sup> sobre valores normales de 0,8 mg kg<sup>-1</sup> como resultado final del proceso de pérdida de degradación de la fertilidad de los suelos pampeanos.

## Nitrógeno

El rendimiento del maíz está estrechamente relacionado con la oferta hídrica y nitrogenada durante todo su ciclo de crecimiento, por lo tanto, la respuesta a la fertilización con N depende del rendimiento posible de alcanzar en un ambiente determinado (Espósito et al., 2017). Por lo tanto, la fecha de siembra modificará la respuesta al N por el rendimiento alcanzado y/o por cambios en la biodisponibilidad nitrogenada. Ello puede evidenciarse en la **Figura 3** en la cual se puede apreciar que en el ensayo 1 el rendimiento y la respuesta al N en siembra tardía fue superior a la temprana, mientras que en los ensayos 2 y 3 se encontró lo contrario.

Otro aspecto muy importante para destacar es la interacción entre la densidad de siembra y la fertilización nitrogenada (**Figura 4**), dado que a medida que aumenta la oferta de N aumenta la densidad óptima de siembra. Esta situación indicaría que para un determinado ambiente productivo (definido por el rendimiento posible de

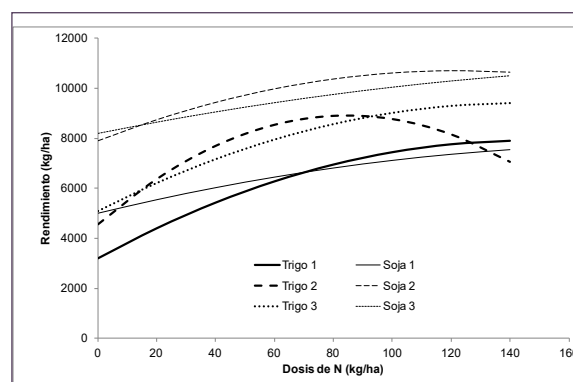


**Figura 4.** Interacción entre la densidad de siembra de maíz y la fertilización nitrogenada.

obtener) existe una densidad de siembra óptima (Cerliani et al., 2018a), a la cual debe suministrarse una cantidad óptima de N. La producción por planta en el rango de la densidad óptima es constante y dependiente del material genético y a esa densidad óptima la cantidad de N por planta óptimo es fija (Cerliani et al., 2018b).

La respuesta al N es modificada por el cultivo antecesor a través de su dinámica nutricional. En general, el maíz de siembra temprana y tardía se cultiva sobre restos del cultivo de soja del año anterior y para ello son válidas todas las consideraciones realizadas anteriormente. En los restantes casos, maíz tardío sobre cultivo de servicios o maíz de segunda sobre trigo u otro cultivo invernal, la respuesta al N cambia drásticamente. Como puede observarse la **Figura 5**, el maíz sobre trigo de cosecha presentó en los 3 ensayos realizados un rendimiento del tratamiento testigo menor que sobre soja y esta situación explica el "valor de reemplazo del fertilizante", VRF, el cual es la cantidad nitrógeno aportada por la rotación (Varvel y Wilhelm, 2003). De acuerdo a las estimaciones realizadas en el Sur de Córdoba, el VRF de la comparación antecesor soja vs trigo de cosecha osciló entre 31 y 68 kg de N por ha, lo cual debería incluirse en el diagnóstico de las necesidades de N.

En el caso de los cultivos de servicio del tipo gramíneas (cebada, centeno o trigo) se ha registrado una inmovilización del N del suelo que afectaría la disponibilidad de N durante la floración del maíz, siempre y cuando sus necesidades no estén cubiertas por fertilización con N,



**Figura 5.** Función de producción de maíz según dosis de N aplicado, en siembras tardías sobre trigo de cosecha o sobre antecesor soja, en tres ensayos realizados en el sur de Córdoba.

en cambio el empleo de vicia como cultivo de cobertura invernal genera un aporte entre 30 a 40 kg ha<sup>-1</sup> de N por cada tonelada de materia seca de vicia producida.

### Síntesis final

Como se presentó en este trabajo, la comparación de las estrategias de fertilización entre el maíz temprano, tardío o de segunda indica que para los nutrientes P, S y Zn el manejo nutricional es semejante y dependiente de la disponibilidad edáfica. Por el contrario, el manejo del N sobre antecesor soja es indistinto de la fecha de siembra del maíz y dependiente del rendimiento objetivo. Finalmente, sobre antecesor trigo de cosecha las necesidades de fertilización con N se incrementan entre 31 y 57 kg ha<sup>-1</sup> y sobre cultivos de servicios difiere significativamente entre vicia y cereales de invierno.

### Bibliografía

- Barbieri, P.; H. Sainz Rozas; N. Wyngaard; M. Eyherabide; N. Reussi Calvo; F. Salvagiotti; A. Correndo; P. Barbagelata; G. Espósito Goya; J. Colazo and H. Echeverría. 2017. Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn? SSSJ. doi:10.2136/sssaj2016.09.0316.
- Bolsa de Cereales de Bs. As. 2018. Departamento de estimaciones agrícolas. Congreso MAIZAR.
- Castillo C.; G. Espósito & R. Balboa. 2006. Fertilización del maíz en el sur de Córdoba. Interacción entre nitrógeno y azufre. Resúmenes. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Organizado por la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 12 al 22 de septiembre de 2006. Salta y Jujuy, Argentina.:300
- Cerliani, C.; G. Espósito; F. Morla; G. Balboa & G. Naville. 2018a. Relación entre la densidad óptima agronómica y el número de granos por planta en maíz (*Zea mays* L.). European Scientific Journal. 14 (9):29-45.
- Cerliani, C.; G. Espósito; F. Morla & R. Naville. 2018b. Generación de prescripciones de densidad variable a escala de lote en el sur de la provincia de Córdoba (Argentina). Primer Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión. 11 al 13 de abril. Santiago, Chile.
- Espósito, G.; M. Díaz-Zorita; G. Balboa; C. Cerliani & Martínez Bologna. 2014. Revisión de estudios de fertilización de cereales en Argentina. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- Espósito, G.; G. Balboa; C. Cerliani & R. Balboa. 2014. Eficiencia agronómica del fósforo en maíz afectada por la fertilización con zinc. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- Espósito, G.; C. Cerliani; R. Naville & G. Balboa. 2017. Impacts of crop management practices on corn yield gap. Proceedings 7th World Congress on Conservation Agriculture. Rosario. 1 - 4 de August 2017.: 162.
- Espósito, G.; G. Balboa; C. Cerliani; R. Balboa & C. Castillo. 2015. Rendimiento potencial de maíz. En: El cultivo de maíz en san Luis. Ed. Juan Cruz Colazo Jorge Alberto Garay y Hugo Veneciano. Ediciones INTA Centro Regional La Pampa - San Luis. INTA Anguil. Argentina.:32-52.
- Varvel G. and W. Wilhelm. 2003. Soybean Nitrogen Contribution to Corn and Sorghum in Western Corn Belt Rotations. Agron. J. 95.:1220-1225. ◀



## Soja de alto rendimiento: ¿Cómo la nutrimos?

Fernando Salvagiotti

Grupo de Manejo de Cultivos, Suelo y Agua - EEA INTA Oliveros - Santa Fe  
salvagiotti.fernando@inta.gob.ar

### La captura de recursos en cultivos de alto rendimiento

La acumulación de hidratos de carbono, aceite y proteínas definen el rendimiento en soja, por lo que la limitación a la expresión del máximo rendimiento estará definida principalmente por la acumulación de carbono (C) y nitrógeno (N). Altas tasas fotosintéticas requieren una alta acumulación de N en las hojas, en donde se encuentra el aparato fotosintético de los cultivos (Sinclair, 2004). La eficiencia en el uso de la radiación (EUR) es una medida indirecta de la actividad fotosintética de un cultivo, que indica la cantidad de biomasa producida por unidad de radiación interceptada en un tiempo determinado (Sinclair y Muchow, 1999). Algunos autores han mostrado en soja que la máxima EUR es alrededor de  $1.2 \text{ g MJ}^{-1}$  y la máxima tasa de acumulación de N es de alrededor de  $0.6 \text{ g N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (Sinclair, 1986; Sinclair et al., 2003).

En soja de alto rendimiento, el déficit hídrico generalmente es reducido. Evidencias en soja de alta producción han mostrado que consumos de agua por encima de 600 mm no necesariamente aumentan la producción de soja. En consecuencia, en ambientes de alto rendimiento otros factores además del agua pueden afectar el logro de altos rendimientos en soja. La eficiencia en el uso del agua máxima en soja estaría entre 9 y 10 kg de grano por mm de agua evapotranspirada (Grassini et al., 2015). Es así que la captura de radiación y  $\text{CO}_2$  definirá el logro de altos rendimientos y, en consecuencia, para alcanzar mayor rendimiento por unidad de superficie también es necesario que aumente la EUR. Mediciones realizadas en soja que rindieron entre 6245 y 7112 kg ha<sup>-1</sup> mostraron mayores eficiencias en el uso de la radiación, entre 0.96 y  $1.77 \text{ g MJ}^{-1}$  (Van Roekel y Purcell, 2014).

Para que estos niveles de captura y eficiencia ocurran, el manejo de los nutrientes será la clave para que la captura de los recursos se mantenga

a estas tasas. En consecuencia, en escenarios de alta producción, para mantener las altas tasas de captura de recursos, la disponibilidad de nutrientes no puede ser limitante. Estudios en soja de alta producción en el sur de Santa Fe muestran que grupos de alto rendimiento (entre 5232 y 5898 kg ha<sup>-1</sup>) tienen un consumo 356, 40, 185, 21, 75, 33, 0.78, 0.24 y 0.53 kg de N, P, K, S, Ca, Mg, B, Zn y Mn, respectivamente.

En la región de producción sojera en Argentina se ha identificado que las deficiencias de N, fósforo (P) y azufre (S) son las que pueden limitar en mayor medida los rendimientos de los cultivos (Salvagiotti et al., 2012). En cultivos de alta producción también se ha informado de aumentos en el rendimiento por la adición de micronutrientes. La respuesta a la fertilización con cationes (K, Ca o Mg) se ha observado en situaciones muy particulares. En un planteo de alta producción es necesario identificar los nutrientes deficientes en los suelos y/o aquellos que son necesarios para sostener la demanda de nutrientes de un cultivo de alta producción. La fertilización química, el uso de cultivos de cobertura, la adición de abonos orgánicos o el uso de microorganismos asociados o simbióticos, son herramientas que contribuirán a sostener dicha demanda. Por otra parte, la excesiva adición de fertilizantes químicos puede tener efectos negativos sobre el ambiente (Carpenter et al., 1998; Robertson y Vitousek, 2009). En consecuencia, para un manejo eficiente de la fertilización en soja, se debe conocer no solo la eficiencia de uso de los fertilizantes, sino también la importancia relativa de cada nutriente en la generación del rendimiento y además las proporciones relativas de cada uno de ellos para maximizar el rendimiento en el cultivo. Esto implica un conocimiento profundo de las relaciones suelo-planta, involucrando la ecofisiología y nutrición del cultivo, la fertilidad química del suelo y la microbiología del suelo.

## La demanda de nutrientes en soja de alto rendimiento

### ¿Cuál es el requerimiento de N en soja?

En promedio, se requieren aproximadamente 80 kg de N para producir 1 tonelada de grano de soja, dentro de un rango entre 53 y 156 kg de N por tonelada (inversa de las pendientes en la **Figura 1A**). En el primer caso (máxima dilución del N), la eficiencia en el uso de este nutriente es máxima y la disponibilidad de N podría estar limitando el rendimiento (límite superior en **Figura 1A**). En el segundo caso, por el contrario, existe la **máxima acumulación de N** (límite inferior en **Figura 1**) y el rendimiento está limitado por otros factores que no son la disponibilidad de N (Salvagiotti et al, 2008; Ciampitti y Salvagiotti, 2018). Entonces, por ejemplo, si el cultivo acumula en biomasa aérea 300 kg N ha<sup>-1</sup>, se esperaría que el rendimiento fuese 1500, 3600 o 5600 kg ha<sup>-1</sup> para las líneas de máxima acumulación, mediana y de máxima dilución, respectivamente (**Fig. 1A**). Esto pone de manifiesto que la interacción entre manejo, genotipo y ambiente son factores afectan la eficiencia interna en el uso del N en soja. Estos números no tienen en cuenta el aporte de N de raíces, nódulos y deposiciones.

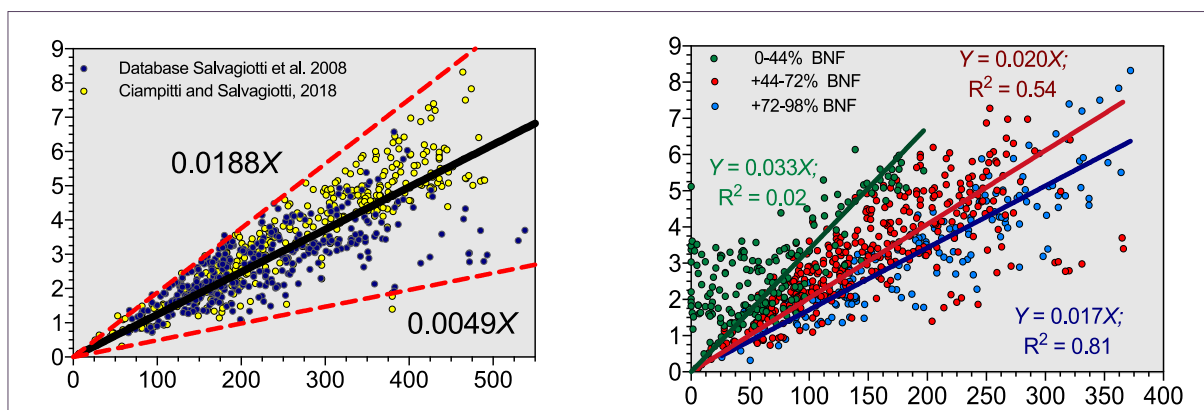
El N cumple con dos funciones esenciales en los cultivos: i) formar parte del sistema enzimático de las células, esencial para el funcionamiento del cultivo a lo largo del ciclo, y ii) formar parte de las proteínas de reserva de la semilla. En el primer caso, cobra un rol central la presencia del N como parte de la enzima Rubisco y otras involucradas en el proceso de asimilación de CO<sub>2</sub>, ocupando más del 60% del N en las hojas

(Kumar et al., 2004). La relación positiva entre la cantidad de N absorbido por un cultivo de soja y el rendimiento (Salvagiotti et al., 2008) estaría explicada por el hecho de que la mayor parte del N en las hojas forma parte del aparato fotosintético.

Durante la etapa de llenado de grano, existe una gran demanda de N por el alto requerimiento de N de las semillas, sin embargo, las tasas de absorción de N a través de la FBN o del suelo disminuyen relativamente durante este periodo (Salvagiotti et al., 2009). En este contexto, la movilización de N desde las hojas cobra una importancia relativa mayor. La removilización de N será una limitante para el rendimiento, ya que se reducirá el pool de N en las hojas acumulado como Rubisco. Estudios recientes han mostrado que la removilización puede representar en promedio el 60% del contenido de N de las semillas. En soja de mayor rendimiento, la participación proporcional de esta fuente es menor, y cobra importancia adicional la captura de N durante el llenado de las semillas (vía suelo o a través de la FBN) (Ortez et al., 2019).

### ¿Cuál es el rol de la FBN para sostener la demanda de N?

La cantidad de N que fije el cultivo de soja está relacionada directamente con la producción de cultivos. En general, se observa una fuerte asociación entre crecimiento, rendimiento, asimilación de N, y fijación de N. En la **Figura 1B** se observa la relación entre el rendimiento en soja y el aporte de N de la FBN. En cultivos donde el aporte de la FBN es menor al 44% esta relación no es consistente y la absorción de N del cultivo



**Figura 1.** Relación entre el contenido de N en biomasa aérea y el rendimiento (Panel izquierdo - A) y entre el N derivado de FBN y el rendimiento (Panel derecho - B) en soja (Ciampitti y Salvagiotti, 2018).



dependerá más fuertemente del aporte del N del suelo (especialmente para los casos de alto rendimiento). Para los grupos de contribución intermedia (44-72%) o grande de la FBN (>72%), como está definida en la **Figura 1B**, la relación rendimiento – N derivado de la FBN es más fuerte, aportando respectivamente 50 y 59 kg de N fijado por tonelada de soja producida. Esto demuestra la importancia de la FBN en soja de alto rendimiento para satisfacer la demanda de N. En Argentina se ha estimado a nivel nacional un aporte promedio del 60% (con un rango intercuartil entre 46% a 71%), observándose los mayores aportes de la FBN en los ambientes de mayor rendimiento (Collino et al., 2015). Es importante destacar que además del potencial de rendimiento, la disponibilidad de P, el pH del suelo, la disponibilidad de agua y las temperaturas en el llenado de las semillas van a afectar la magnitud del aporte de la FBN. En la **Tabla 1** se resumen los resultados de un estudio (Santachiara et al., 2017), en donde claramente se observa que el grupo de cultivares de mayor absorción de N son aquellos que tienen un mayor aporte de la FBN.

### ***¿Un cultivo de soja de alto rendimiento está limitado por la disponibilidad de N? ¿Existe una brecha de N no cubierta por la FBN?***

Teniendo en cuenta la competencia por N durante el llenado de granos entre el aparato fotosintético y las semillas, existen evidencias que sugieren limitaciones por N a altos niveles de rendimiento, por encima de los 6000 kg ha<sup>-1</sup> (Cafaro La Menza et al., 2017). Analizando la relación entre el contenido de N en el cultivo y el N derivado de la FBN, se puede visualizar la existencia de una brecha de aporte de N (brecha de N = N absorbido – N fijado) (**Figura 2A**). Se

puede observar que cultivos de soja que tienen un gran aporte de FBN (mayor de 72%) son los que se acercan más a la línea 1:1 (aquella que indica que el 100% del N absorbido proviene de la FBN). Una relación cuadrática explica mejor la relación entre estas variables para este grupo, es decir que en la medida que aumenta la absorción de N, la contribución de la FBN es relativamente menor. La **Figura 2B** muestra esta brecha en función de la demanda de N. Para %FBN superiores al 72% esta brecha es mínima a bajos niveles de demanda de N y se incrementa a ca. 115 kg N ha<sup>-1</sup> para absorciones de N superiores a los 400 kg N ha<sup>-1</sup> (que sería equivalente a una soja de 5000 kg ha<sup>-1</sup> de rendimiento).

**Tabla 1.** Rendimiento, N absorbido total, N derivado de la fijación biológica y del suelo en dos grupos de cultivares con alta y baja absorción de N (Adaptado de Santachiara et al., 2017). Cada grupo representa promedio de distintos cultivares.

Grupo de cultivares	Rendimiento	N absorbido total	N derivado de la FBN	N derivado del suelo	FBN
	kg ha <sup>-1</sup>	kg N ha <sup>-1</sup>			%
Alta absorción de N <sup>x</sup>	5834	407	290	116	71
Baja absorción de N <sup>xx</sup>	4674	332	224	109	67
	*	*	*	NS	*

\* Diferencias significativas al 5%; NS: sin diferencias significativas

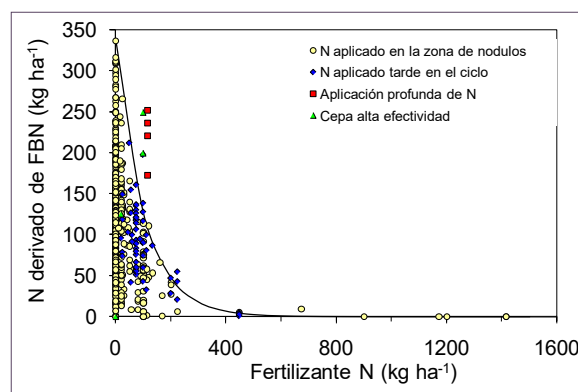
<sup>x</sup> Promedio de 9 cultivares; <sup>xx</sup> promedio de 5 cultivares

### ¿Hay que fertilizar con N cultivos de soja de alto rendimiento?

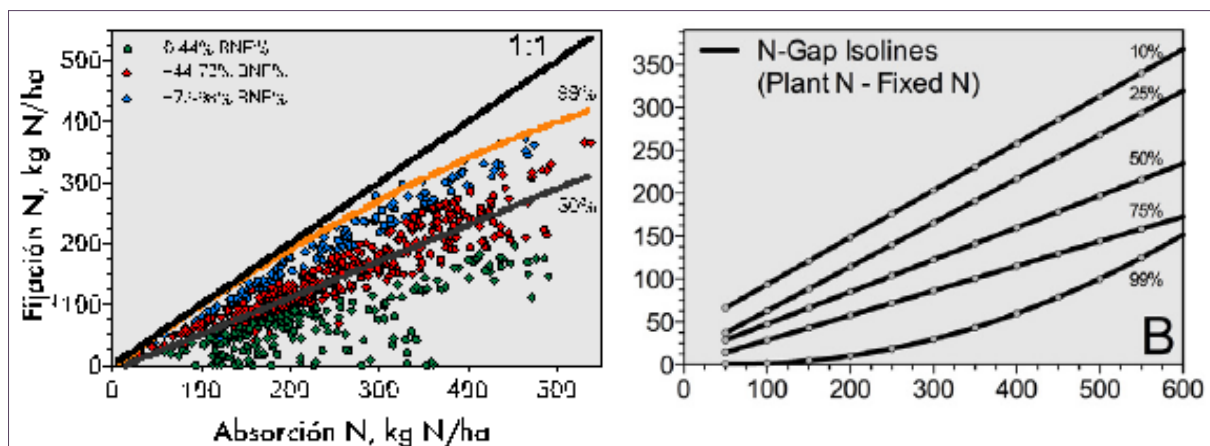
La presencia de nitratos en el suelo ejerce un efecto represor sobre la fijación biológica de N. En consecuencia, la magnitud del aporte de N a través de la FBN se verá seriamente afectado por la aplicación de fertilizantes nitrogenados, por el aporte de N a través de la mineralización de la materia orgánica, o en lotes que presentan fuerte intensidad de fertilización nitrogenada en cultivos antecesores que dejan altos contenidos residuales de nitratos. Como se observa en la **Figura 3**, la FBN disminuye exponencialmente cuando se incrementa la dosis de fertilizante nitrogenado en el área de mayor desarrollo de los nódulos. Santachiara et al (2017) mostraron que la FBN disminuye a razón de 1.4 kg de N por kg de N que el cultivo absorbe del suelo.

Los resultados de ensayos con fertilización nitrogenada en la literatura muestran resultados erráticos, con un fuerte predominio de estudios en donde no hay respuesta a la fertilización nitrogenada. En general, los cultivos de soja que han respondido positivamente a la fertilización nitrogenada se observaron cuando las condiciones fueron desfavorables para el normal funcionamiento de los nódulos (Salvagiotti et al., 2008). En ensayos realizados en la región pampeana sólo se encontraron aumentos en el rendimiento por el agregado de N en lotes con ningún o un sólo cultivo previo de soja, donde se presume que no había una gran población de rizobios naturalizados en el suelo. En sitios con dos o más cultivos previos de soja la fertilización nitrogenada no tuvo ningún efecto (Bodrero et al., 1985).

Teniendo en cuenta que sojas de alto rendimiento pueden estar limitadas por la disponibilidad de N, un estudio reciente evaluando genotipos de distinta época de liberación y potencial de producción mostró que la aplicación de dosis comerciales de N (ca. 50 kg N ha<sup>-1</sup>) en superficie no son capaces de poder satisfacer el N adicional necesario para superar las limitantes de N (**Figura 4**) (Ortez et al., 2018). Estudios realizados en soja con rendimientos superiores a los 5000 kg ha<sup>-1</sup>, mostraron incrementos del 5% cuando el cultivo fue fertilizado con 180 kg N ha<sup>-1</sup>, y sin afectar la FBN colocando un fertilizante de liberación lenta por debajo del área de mayor proliferación de nódulos (Salvagiotti et al., 2009).



**Figura 3.** Relación entre el N derivado de la fijación biológica (FBN) y el N aplicado como fertilizante (Adaptado de Salvagiotti et al, 2008).



**Figura 2.** Relación entre el contenido de N en biomasa aérea y el N derivado de la FBN (Panel izquierdo - A) y la brecha de N (Panel derecho - B) en soja (Ciampitti and Salvagiotti, 2018).

## ¿Cómo manejamos la fertilización con P y S en soja de alto rendimiento?

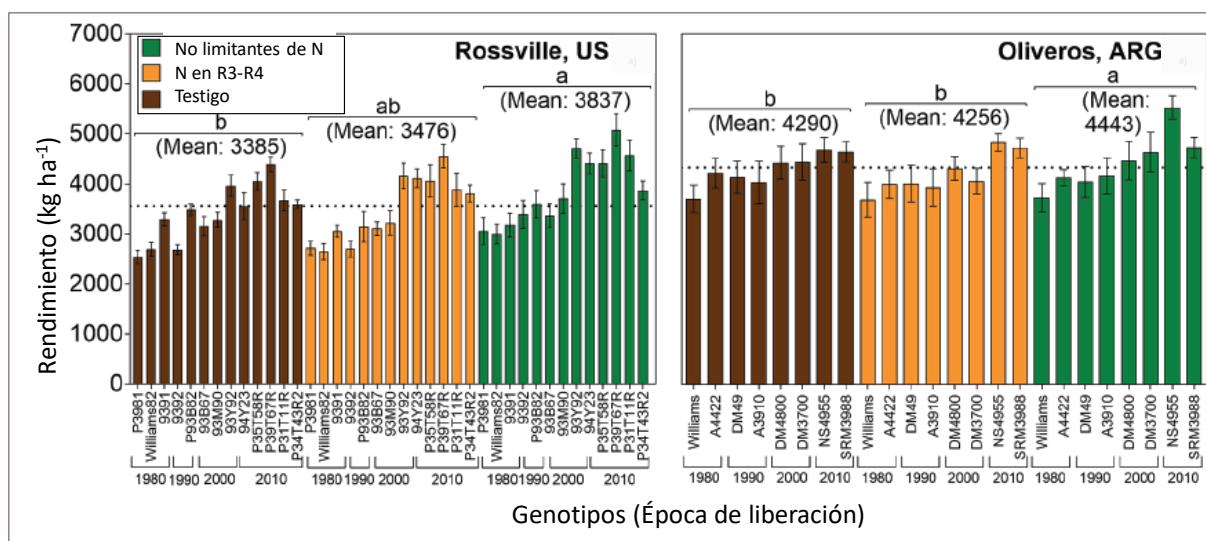
Al planificar el manejo de nutrientes como el P y el S que tienen mediana a baja movilidad en el suelo, se deben tener en cuenta los efectos directos en el cultivo, como así también los efectos residuales que puedan dejar en los cultivos que continúan en la secuencia (Ferraris et al., 2010; Salvagiotti et al., 2004). La disponibilidad de P en las etapas más tempranas del desarrollo del cultivo es clave ya que las plantas tienen una gran necesidad de P para producir las proteínas necesarias que mantengan este activo crecimiento (Agren, 2004). El mayor potencial de rendimiento del cultivo de soja implica una mayor absorción de P. Sin embargo, la mayor producción no implica un aumento en los umbrales de respuesta determinados por el nivel de P Bray en el suelo. En la **Figura 5** se puede observar que aun cuando la respuesta a la fertilización es mayor en los sitios con menores contenidos de P en el suelo, esta no guarda relación con el máximo rendimiento por sitio (Gutiérrez Boem y Salvagiotti, 2013). Un meta-análisis realizado recientemente en región pampeana muestra claramente que el factor que define fuertemente el umbral de respuesta a la fertilización con P fue la clase textural del suelo. En este análisis solo se observó una tendencia a aumentar el umbral de respuesta a P con el aumento en el potencial de rendimiento de soja en los suelos de clase fina,

no así en las clases media y gruesa (**Figura 5**), aunque esto necesitaría estudios más profundos para corroborar esta tendencia (Correndo et al., 2018). En consecuencia, la clave para la fertilización con P es identificar el nivel de P que existe en el suelo a través del análisis de P Bray en los 20 cm superficiales y cuantificar el poder buffer del mismo (Boschetti et al., 1998).

En el caso del S, desde el punto de vista fisiológico como en otros cultivos, está ligado a la nutrición nitrogenada. El S es componente de las principales enzimas involucradas en la absorción, fijación y asimilación de N en la planta (Takahashi et al., 2011). Por otra parte, las proteínas de reserva del grano, ricas en aminoácidos azufrados (metionina y cistina) tendrán una alta demanda de S (Sexton et al., 1998). Salvagiotti et al. (2012) observaron que, para no estar limitado por S, el cultivo de soja necesita acumular 8 kg S ha<sup>-1</sup> en semilla o tener una relación N:S en semillas de ca. 22:1. Divito et al. (2015) observaron que esta relación era un poco más baja (13.5:1) por debajo de la cual la probabilidad de respuesta a la fertilización con S era mas alta.

## ¿Cómo manejamos la fertilización la aplicación de micronutrientes en soja de alto rendimiento?

En un meta-análisis realizado en región pampeana con datos de experimentos en donde se



**Figura 4.** Rendimiento de cultivares de soja liberados en distintas épocas en función de tres tratamientos de nutrición nitrogenada: (i) Sin limitantes de N (aplicación de 500 kg N ha<sup>-1</sup> repartidos en tres momentos del ciclo); (ii) 50 kg N ha<sup>-1</sup> aplicado en R3-R4 y (iii) Testigo sin fertilización (Ortez et al., 2018).

analizaron los efectos netos de la aplicación de B, Co-Mo y Zn en soja (Figura 6). Comparando el rendimiento de tratamientos fertilizados con estos nutrientes en relación a los testigos sin aplicación de fertilizantes, la pendiente de la relación indica cuanto se desvía de la línea 1:1 que sería la situación sin respuesta a la adición de fertilizantes. Para este conjunto de datos las respuestas a B, Zn y Co-Mo son de un 4.5, 2.8 y 2.5%, respectivamente, observándose que la respuesta es levemente mayor cuando el nivel de rendimiento aumenta (Salvagiotti, 2014).

## Conclusiones

Para mantener las altas tasas de asimilación de C que impactara en la producción, la disponibilidad de N no debe ser limitante.

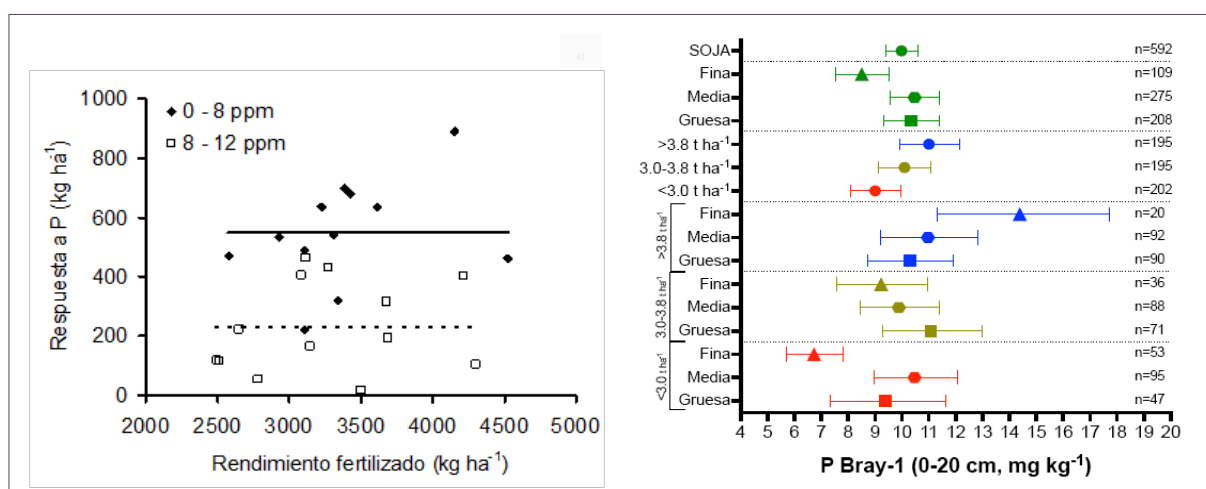
En soja, los altos requerimientos de N deben primordialmente ser satisfechos a través del aporte de la fijación biológica de N, y se deben optimizar las prácticas de manejo que maximicen este aporte. La inoculación con cepas de alta efectividad y utilizando productos que tengan calidad en cuanto al número de bacterias y las condiciones de conservación. El éxito de esta práctica se verá potenciada si las prácticas de manejo del cultivo y del suelo están dirigidas a optimizar el ambiente para la simbiosis rizobio-soja.

La reducción en la brecha nutricional en soja

estará relacionada con la identificación de los nutrientes deficientes en el suelo y la definición del potencial de producción del ambiente. La corrección de estas deficiencias aumentará la asimilación de N y el logro de altos rendimientos en soja.

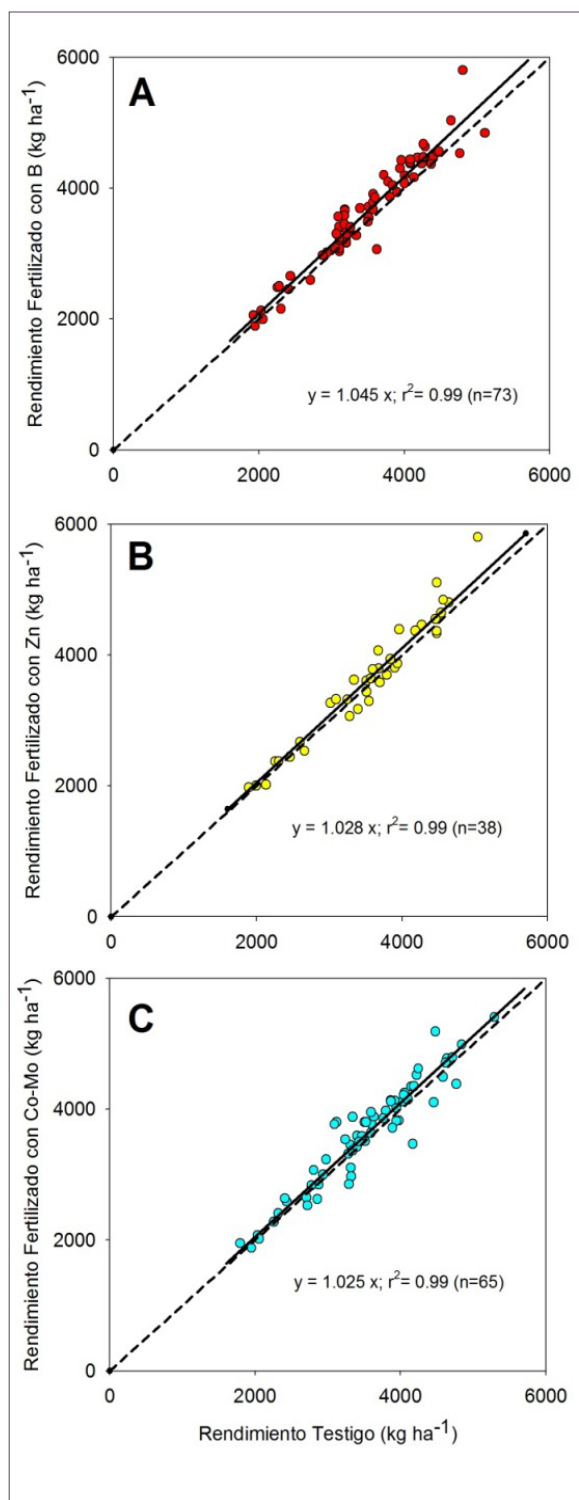
El manejo de la nutrición en soja de alto rendimiento surge de la interacción con aspectos ecofisiológicos del cultivo, de la dinámica de los nutrientes en el suelo y de la microbiología y la interacción rizobio-cultivo.

El éxito de una soja de alta producción es el reflejo del manejo del sistema de producción en la cual el cultivo está incluido. De esta manera, decisiones relacionadas con el manejo de las secuencias que afectan la disponibilidad de agua y nutrientes en el largo plazo aportan al logro de altos rendimientos en soja.



**Figura 5.** Panel izquierdo: Respuesta a la fertilización con fósforo en función del rendimiento de cultivos fertilizados. Las líneas representan la respuesta promedio para cada clase de disponibilidad (Gutiérrez Boem y Salvagiotti, 2013). Panel derecho: Comparación de niveles críticos de P-Bray-1 (0-20 cm) para el logro del 90% del rendimiento relativo en el cultivo de soja, utilizando el set de datos completo (todos) o segregado según potencial de rendimiento, clase textural del suelo, y la interacción potencial de rendimiento x clase textural. Las barras horizontales indican el intervalo de confianza de los niveles críticos (95%). Superposición significa ausencia de diferencias significativas (Correndo et al., 2018)





**Figura 6.** Relación entre los rendimientos observados en los tratamientos testigo (Sin aplicación de micronutrientes) y el rendimiento observado en tratamientos que recibieron fertilización con Boro (A), Zinc (B) y Cobalto-Molibdeno (Co-Mo) en soja en la región pampeana (Salvagiotti, 2014).

## Referencias

- Agren, G.I. 2004. The C:N:P stoichiometry of autotrophs: theory and observations. *Ecology Letters* 7, 185-191.
- Bodrero, M.L., Martignone, R.A., Nakayama, F., Macor, L. 1985. Outlook on nitrogen fertilization in soybean crops. *Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires* 6, 39-44.
- Boschetti, N., Quintero, C., Benavidez, R. 1998. Caracterización do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Ríos, Argentina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 22, 95-99.
- Cafaro La Menza, N., Monzón, J.P., Specht, J.E., Grassini, P. 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? *Field Crops Research* 213, 204-212.
- Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N., Smith, V.H. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications* 8, 559-568.
- Ciampitti, I.A., Salvagiotti, F. 2018. New insights into soybean biological nitrogen fixation. *Agronomy Journal* 110[4], 1-12.
- Collino, D.J., Salvagiotti, F., Peticari, A., Piccinetti, C., Ovando, G., Urquiaga, S., Racca, R.W. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392, 239-252.
- Correndo, A., Salvagiotti, F., García, F., y Gutiérrez Boem, F. 2018. Recalibración de umbrales críticos de P-Bray para maíz y soja en Argentina. CLAP. Santiago, Chile.
- Divito, G.A., Echeverría, H., Andrade, F.H., Sadras, V.O. 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: Performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. *Field Crops Research* 180, 167-175.
- Ferraris, G., Couretot, L., Toribio, M., Falconi, R. 2010. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos, el balance de nutrientes y su disponibilidad en los suelos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 45, 16-21.
- Grassini, P., Torrión, J.A., Yang, H.S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K.G., Specht, J.E. 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *Field Crops Research* 179, 150-163.
- Gutiérrez Boem, F. Salvagiotti, F. 2013. Soja. In: Fertilidad de suelos y Fertilidad de cultivos. INTA, Buenos Aires.
- Kumar, P., Parry, M., Mitchell, R., Ahmad, A., Abrol, Y. 2004. Photosynthesis and Nitrogen-Use Efficiency. In: *Photosynthetic Nitrogen Assimilation and Associated Carbon and Respiratory Metabolism*. pp. 23-34.
- Ortez, O., Tamagno, S., Salvagiotti, F., Vara Prasad, P.P.V., Ciampitti, I. 2019. Soybean nitrogen sources and demand during the seed filling period. *Agronomy Journal*, en prensa

**Ortez, O.A., Salvagiotti, F., Enrico, J.M., Prasad, P.V.V., Armstrong, P., Ciampitti, I.A.** 2018. Exploring Nitrogen Limitation for Historical and Modern Soybean Genotypes. *Agron J* 110, 2080-2090.

**Robertson, G.P., Vitousek, P.M.** 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 97-125.

**Salvagiotti, F., Cassman, K.G., Specht, J.E., Walters, D.T., Weiss, A., Dobermann, A.** 2008. Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research* 108, 1-13.

**Salvagiotti, F., Ferraris, G., Quiroga, A., Barraco, M., Vivas, H., Prystupa, P., Echeverría, H.E., Gutiérrez Boem, F.H.** 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Research* 135, 107-115.

**Salvagiotti, F., Gerster, G., Bacigaluppo, S., Castellarín, J.M., Galarza, C., González, N., Gudelj, O., Novello, O.A., Pedrol, H.M., Vallone, P.** 2004. Efectos residuales y directos de fósforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del suelo* 22[2], 92-101.

**Salvagiotti, F., Specht, J.E., Cassman, K.G., Walters, D.T., Weiss, A., Dobermann, A.** 2009. Growth and Nitrogen Fixation in High-Yielding Soybean: Impact of Nitrogen Fertilization. *Agron J* 101, 958-970.

**Salvagiotti, F.** 2014. Respuesta a la fertilización y requerimientos de micronutrientes en cultivos de la región pampeana. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACs*

**Santachiara, G., Borrás, L., Salvagiotti, F., Gerde, J.A., Rotundo, J.L.** 2017. Relative importance of biological nitrogen fixation and mineral uptake in high yielding soybean cultivars. *Plant and Soil* 1-13.

**Sexton, P.J., Paek, N.C., Shibles, R.M.** 1998. Effects of nitrogen source and timing of sulfur deficiency on seed yield and expression of 11S and 7S seed storage proteins of soybean. *Field Crops Research* 59, 1-8.

**Sinclair, T.** 2004. Improved carbon and nitrogen assimilation for increased yield. In: Boerma, H.R., Specht, J.E. (Ed.), *Soybeans: improvement, production and uses*. ASA - CSSA - ASSA, pp. 537-568.

**Sinclair, T.R.** 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *Field Crops Research* 15, 125-141.

**Sinclair, T.R., Farias, J.R., Neumaier, N., Nepomuceno, A.L.** 2003. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. *Field Crops Research* 81, 149-158.

**Sinclair, T.R., Muchow, R.C.** 1999. Radiation use efficiency. *Advances in Agronomy* 65, 215-265.

**Takahashi, H., Kopriva, S., Giordano, M., Saito, K., Hell, R.** 2011. Sulfur Assimilation in Photosynthetic Organisms: Molecular Functions and Regulations of Transporters and Assimilatory Enzymes. *Annual Review of Plant Biology* 62, 157-184.

**Van Roekel, R.J., Purcell, L.C.** 2014. Soybean Biomass and Nitrogen Accumulation Rates and Radiation Use Efficiency in a Maximum Yield Environment. *Crop Sci* 54, 1189-1196. ◀



## Regulación de fertilizadoras: con la dosis no alcanza

Santiago Néstor Tourn; Juan Ignacio Santos; Mariano Trueba; Rodrigo Lasaga, Dionisio Martinez y  
Walter Carciochi

Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce (UNMdP)  
tourn.santiago@inta.gob.ar

### Introducción

La pérdida de nutrientes del suelo y el uso continuo de siembra directa han provocado incrementos en la respuesta de los cultivos a la adición de nutrientes y su reposición ha ganado importancia (Sainz Rozas et al., 2011). Los nutrientes generalmente deficientes para la producción de cultivos en la región pampeana han sido el nitrógeno (N) y el fósforo (P) (Divito et al., 2011). Su deficiencia puede ser suplida total o parcialmente a partir del agregado de fertilizantes inorgánicos.

Si bien existen fertilizantes en estado sólido, líquido y gaseoso, la aplicación de fertilizantes sólidos en forma granulada es la más utilizada y presenta ciertas ventajas al no tener que diluirse ni mezclarse, presentar menor absorción dérmica y menor deriva (Parish, 2002). La mayoría de los fertilizantes sólidos se presentan en forma de gránulos y su número guía de tamaño (SGN) varía notablemente entre fertilizantes y entre partidas del mismo fertilizante. La urea (46-0-0) es la fuente nitrogenada sólida más utilizada para la fertilización de los cultivos extensivos por su alta solubilidad y concentración de N. Además, es no polar, lo que permite que se pueda mezclar con otros fertilizantes y agroquímicos (Carciochi y Tourn, 2017). Los fertilizantes fosforados son también muy utilizados y si bien gran parte se aplican inyectado al suelo, en los últimos años se han generalizado las aplicaciones por proyección.

La técnica de aplicación por proyección del material predomina en Argentina. El mercado cuenta con una importante cantidad de máquinas para la aplicación de fertilizantes granulados por proyección y los sistemas de distribución más utilizados son los doble-discos y difusores neumáticos (Carciochi y Tourn, 2016). Los primeros, y más utilizados, constan de dos discos con aletas que reciben el fertilizante y lo proyectan por fuerza centrífuga. El ancho de labor es variable ya que se ve afectado por factores propios de la maquinaria (velocidad de giro de los discos,

diámetro de los discos, largo o ángulo de las paletas, altura de aplicación y ángulo de salida de las particular) y del fertilizante (tamaño de partícula, forma, dureza y densidad) (Aloe y Toribio, 2008). Tienden, en general, a conformar una distribución con diagrama de tipo trapezoidal y es necesaria la superposición de pasadas para lograr mayor uniformidad en la distribución del fertilizante (Martinez Peck, 2007). Los motivos de su gran adopción son su precio accesible, fácil mantenimiento, alta velocidad de avance y el amplio ancho de labor (Cerqueria de Luz, 2010). En las fertilizadoras neumáticas, el fertilizante baja de la tolva por presión (tolva presurizada) y gravedad, luego es dosificado por un conjunto de rodillos y arrastrado por una corriente de aire generada por ventiladores centrífugos. El transporte es a través de tuberías adosadas a un botallón hasta los difusores que provocan la distribución del material en el terreno (Piveta, E. com. per., 2018). La principal diferencia de la distribución del material entre los dos mecanismos de distribución (discos y difusores neumáticos) está en la proyección del material. En los sistemas de discos la partícula de fertilizante recorre una distancia lateral y luego cae por gravedad. Esto genera que durante el recorrido lateral la trayectoria de la partícula puede modificarse por factores como el viento o bien la arquitectura del cultivo sobre el que se aplica. En cambio la proyección neumática de la partícula de fertilizante es hacia abajo formando un ángulo de 45-50° con la superficie del suelo. Este tipo de trayectoria disminuye el tiempo en que la partícula está expuesta al viento y se ve menos afectada por el canopeo (Parish, 2002). La variación del tamaño de partícula en y entre las partidas de fertilizantes es el factor físico más influyente en máquinas doble disco y hace necesario cambios en la configuración del sistema distribuidor para lograr uniformidad en su aplicación (Márquez, 2011). La distribución neumática, permite la aplicación de fertilizantes con tamaño de partícula desuniforme manteniendo la uniformidad de distribución, respecto

a las de doble disco.

En general, la calibración de la dosis en las fertilizadoras resulta muy simple de llevar a cabo, y si bien se registran ineficiencias, la uniformidad de distribución del fertilizante sobre el terreno (UD) es el punto clave al momento de planificar una aplicación de calidad y apta para las tecnologías de fertilización variable. En este punto, las fertilizadoras de doble plato presentan más posibilidades de corrección respecto a las neumáticas. Existe un gran desconocimiento de la UD y de cómo es afectada por los cambios de configuración de los mecanismos distribuidores. Esto puede llevar a generar zonas con diferentes tasas de aplicación, los casos más comunes son:

- a) uniformidad de distribución aceptable y ancho de labor inadecuado,
- b) ancho de labor adecuado y una mala distribución de fertilizante sobre el terreno
- c) ancho de labor inadecuado y mala distribución de fertilizante sobre el terreno.

El parámetro de variación más usado para caracterizar la UD es el coeficiente de variación (CV%). Se consideran aceptables CV% a campo de la distribución de fertilizante igual o menores a 25% (Botta et al., 2001). Distribuciones con CV% por encima de dicho valor, pueden manifestarse en franjeos en los cultivos por baja eficiencia de uso del fertilizante, generando pérdidas de productividad, afectando económica y ambientalmente al sistema (Carciochi y Tourn, 2017).

En los últimos años se ha hecho énfasis en la importancia de configurar las máquinas fertilizadoras, suministrando información de cómo realizarlo (Aloe y Toribio, 2008). Al respecto, se han documentado distribuciones con CV% mayores a 35% en máquinas distribuidoras de doble disco de urea en el sudeste de Buenos Aires (Carciochi y Tourn, 2016). Asimismo, luego de correcciones del sistema de distribución se han logrado valores de CV% inferiores al 25%. Sin embargo, se desconoce para los distintos fertilizantes cuales son los niveles de variación que pueden garantizar una aplicación de calidad.

## Caracterización de la uniformidad de distribución de fertilizadoras por proyección de discos en la Provincia de Buenos Aires

Durante los años 2017 y 2018, en el marco de tareas de investigación y transferencia de Mecanización Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce (UNMdP), se realizaron evaluaciones de desempeño a 45 máquinas fertilizadoras por proyección de discos. El parque de maquinarias evaluado tenía una antigüedad máxima de 5 años y eran de origen nacional e internacional (Tabla 1).

**Tabla 1.** Caracterización de las fertilizadoras de proyección de doble discos evaluadas (total: 45).

Marca de Fertilizadora	Origen	Cantidad
Fertec	Nacional	17
Yomel	Nacional	12
Syra	Nacional	6
Terragator	Internacional	3
SR	Nacional	3
Gimetal	Nacional	2
Metalpaz	Nacional	1
Amazona	Internacional	1

Las evaluaciones consistieron en estimar la UD de fertilizante en el terreno. Se utilizaron urea y superfosfato triple (0-46-0) granulados para las evaluaciones. La urea granulada se usó como fertilizante de referencia dado que, de los más utilizados (superfosfato simple, triple, fosfato diamónico, etc.), es el que presenta mayor desuniformidad de tamaño de partícula. En todos los casos se determinó el SGN de cada muestra y el valor más común fue de  $260 \pm 30$ . El método de determinación de la UD fue una adaptación de la norma IRAM 8041 (Figura 1).

En cada momento de evaluación de la UD se estimó la temperatura, humedad relativa y el viento promedio y ráfagas. Se utilizó como criterios para realizar las pruebas humedad relativa (HR) entre 20 y 70%, velocidad del viento promedio no mayor a  $10 \text{ km h}^{-1}$  y ráfagas de no más de  $15 \text{ km h}^{-1}$ . Las evaluaciones se realizaron siempre en el mismo sentido de la dirección del viento. Se utilizó el CV% y las tolerancias máximas y mínimas (Figura 1) como medida de decisión de necesidad de regulación de la máquina fertilizadora.



Se utilizó un CV% de 25 como límite máximo, las máquinas que luego de la calibración presentan un valor de CV% mayor, se enviaron a fábrica para modificarlas.

La dosis que se utilizó en todas las máquinas fue de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ . Evaluaciones previas arrojaron que la uniformidad de distribución no varía significativamente para un mismo fertilizante y configuración entre  $70$  y  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ . La UD se analizó antes y después de la configuración. Independientemente de su ancho de labor efectivo siempre se utilizaron 25 bandejas recolectoras (Figura 1) y el material recolectado en cada caja fue referido proporcionalmente a la caja que más fertilizante recibió. Por lo tanto, los resultados se presentan en % del valor máximo. Las evaluaciones de las UD antes de la calibración presentaron diversas formas. Fueron caracterizadas de la siguiente manera:

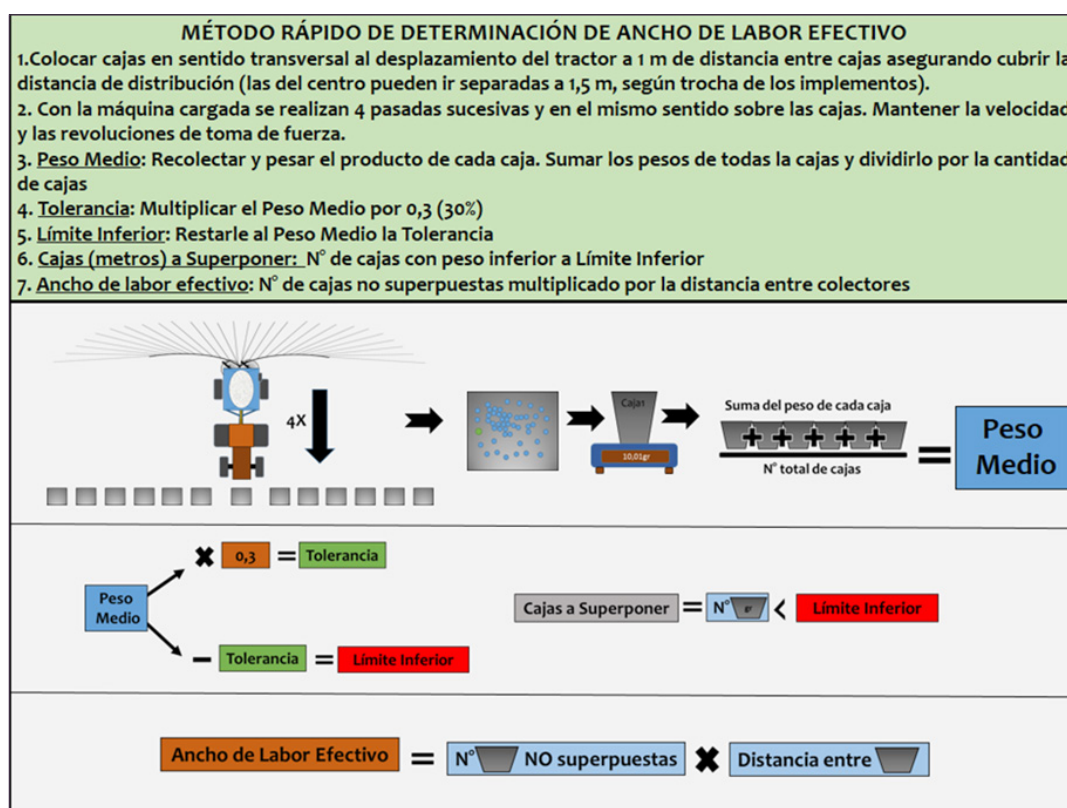
- Punto excesivo central
- Dos puntos excesivos en los extremos (distribución tipo M)
- Tres puntos excesivos (distribución tipo W)

## Resultados de las evaluaciones

En la **Tabla 2** se observa la frecuencia de tipo de distribuciones. Las distribuciones con un punto de acumulación excesivo en el centro y las de tres puntos excesivos (W) fueron las más frecuentes. Sin embargo, en las tipo W tienen un pico excesivo central. Por lo tanto, de las 45 máquinas, 36 presentaron acumulación de fertilizante en la zona central. En la **Figura 2** se muestra un ejemplo de cada tipo de distribución.

**Tabla 2.** Frecuencia de tipo de distribución de fertilizadoras.

Tipo de Distribución	Frecuencia (total 45)
Punto excesivo central	18
Tres puntos excesivos (distribución tipo W)	18
Dos puntos excesivos en los extremos (distribución tipo M)	9



**Figura 1.** Método rápido de determinación a campo de uniformidad de distribución y ancho de labor efectivo. Se utilizaron 25 cajas recolectoras, abarcando el ancho de labor más dos metros. Adaptado de Carciochi y Tourn (2017).

### **Correcciones de acumulación en la zona central de la distribución (Figura 2b):**

Este tipo de inconveniente se debió mayormente a la rotura de fertilizante por excesivas revoluciones de los discos distribuidores. Los gránulos partidos presentan un tamaño menor a la partícula original y, debido a su pérdida de esfericidad y peso, su proyección es menor, acumulándose en la zona central de la distribución. Se logró corregir el exceso de fertilizante disminuyendo las revoluciones de los discos (generalmente no más de un 10% de disminución). Del total las 36 máquinas, 29 presentaron este inconveniente, las restantes presentaban problemas constructivos que generaban pérdida de fertilizante del sistema de dosificación y distribución.

### **Correcciones de distribuciones tipo W (Figura 2a):**

Las zonas con excesos de fertilizante en los extremos de la distribución en las del tipo W generalmente estuvieron asociadas a una incorrecta configuración de las aletas del plato y velocidad excesiva de giro de los discos. En 10 de las 18 máquinas con este inconveniente se logró disminuir notoriamente los tres puntos de excesos (mayormente el central) con solo disminuir las revoluciones de los discos. Sin embargo, la regulación definitiva y menor CV% se logró modificando la posición de alguna de las aletas (acortándolas). En los discos con dos aletas, el cambio de configuración resultó más simple y más efectivo que en discos con tres y cuatro aletas (siempre actuando sobre la aleta corta). La modificación del punto de caída de fertilizante en la mayoría de las máquinas (40) es muy limitado y solo resultaron efectivos para correcciones de zonas entre el centro y los extremos.

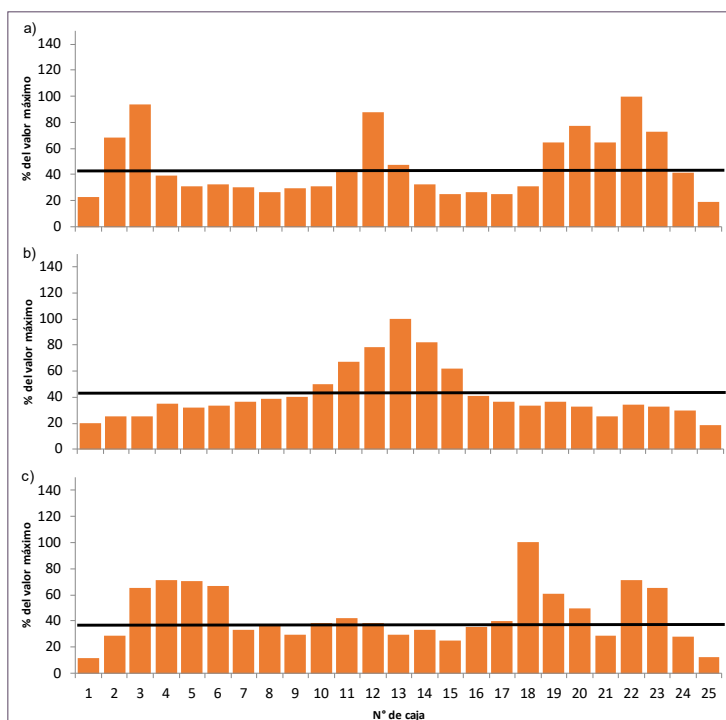
### **Correcciones de distribuciones tipo M (Figura 2c):**

para corregir este tipo de distribuciones se debió actuar sobre las aletas y punto de caída de fertilizante. En primera medida se aconseja configurar las aletas cortas, alargándolas en el caso de 2 y 4 aletas, o bien, alargar 1 o 2 aletas en los discos con 3 aletas iguales. La magnitud del alargue depende de la capacidad de cambio de posición

propio de cada máquina y de la cantidad de material acumulado en las zonas problema. No existe un indicador, es necesario cambiar la configuración y volver a evaluar la UD hasta observar el menor CV% y tolerancias. El punto de caída de fertilizante puede variarse acercándolo al centro del plato para lograr mayor tiempo del material sobre el plato lo que produce mayor trayectoria de las partículas. También es posible mejorar esta distribución corriendo el punto de caída hacia la parte posterior de la máquina.

### **Niveles de variación de las distribuciones antes y después de los cambios en la configuración:**

Las evaluaciones de las máquinas se realizaron por demanda de sus dueños dado a que habían detectado algún problema de calidad de aplicación o bien querían conocer su estado. En general, las primeras evaluaciones de la UD sin superposición de pasadas arrojaron valores de CV% muy altos y en muchos casos inaceptables (Figura 3). Se registraron valores de CV% extremos cercanos a 80% y los más bajos 30%, sin embargo, el promedio fue 53%. Estos niveles de variación a campo no pueden garantizar una aplicación correcta de la dosis y no son aptos



**Figura 2.** Distribuciones de urea de tres fertilizadoras. a) Tipo tres puntos excesivos (W), b) un punto excesivo y c) dos puntos excesivos (M). Línea negra indica el valor promedio.

para sistemas de dosis variable. Cuando se analizaron las UD iniciales con superposición (8%), el CV% promedio disminuyó a 46% (**Figura 4**) y solo una máquina de 45 tuvo un CV% menor de 25. Estos resultados demuestran que la superposición de pasadas no garantiza una mejora notable de las UD con valores de CV% altos.

Luego de las calibraciones, los CV% disminuyeron notablemente y aun si superposición de pasadas las determinaciones arrojaron un CV% promedio de 29%, con extremos entre 40% y 17% (**Figura 3**). En el caso de las máquinas en que el CV% luego de la regulación superaba 35%, se recomendó e informó a las fábricas por problemas estructurales o configuración limitada. Cuando las UD luego de las regulaciones fueron superpuestas (8%), los CV% disminuyeron notablemente (**Figura 4**) registrando un CV% promedio de 22% con extremos de 30% y 13%. Estos niveles de variación son considerados muy buenos a campo y garantizan una muy baja probabilidad de que se generen franjeos en los cultivos y pérdida de rentabilidad.

## Conclusiones de las evaluaciones

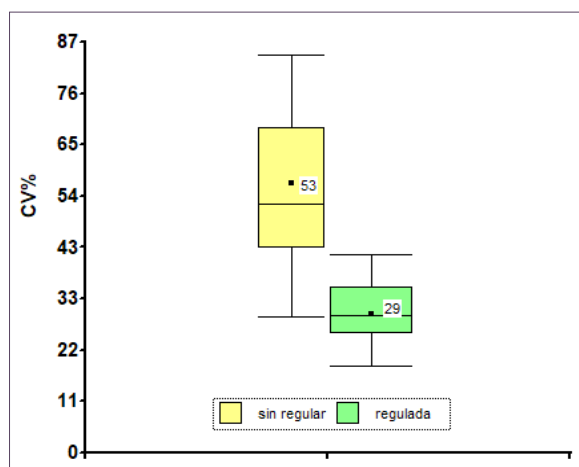
- Es necesaria la evaluación periódica de las UD de las máquinas fertilizadoras para conocer los niveles de variación que presentan, aun cuando son recién adquiridas o con muy poco uso.
- La regulación de la máquina es una actividad

sencilla y de muy bajo costo que puede garantizar un ancho de labor efectivo óptimo y bajo nivel de variación de la dosis objetivo en el terreno.

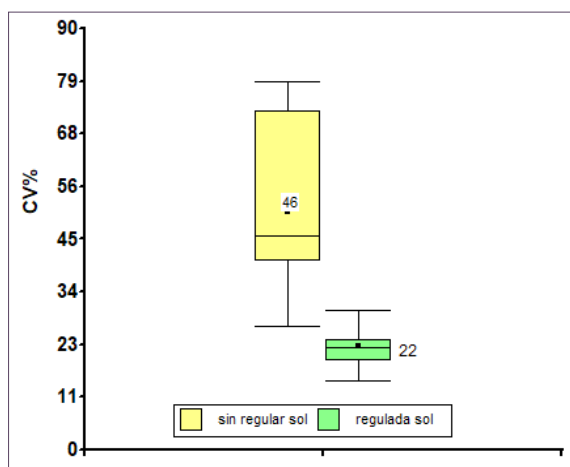
- Si la máquina fertilizadora logra buen desempeño con urea y se utiliza otro fertilizante con mayor SGN y con niveles de dureza similar (superfosfato triple, fosfato di amónico (18-46-0), nitrato de amonio calcáreo (27-0-0), es más probable que la variación esté en el ancho de labor efectivo (mayor que con urea) que en la UD.

## Impacto de la correcta regulación de fertilizadoras por proyección en el rendimiento en grano y el ingreso neto del cultivo de maíz

Entre octubre del 2017 y mayo 2018 se llevó a cabo un ensayo en la Unidad Integrada Balcarce como actividad de tesis de grado de Juan Ignacio Santos y Mariano Trueba. Uno de los objetivos fue evaluar el efecto de la uniformidad de distribución de urea generada por diferentes sistemas de distribución por proyección (de doble discos y neumáticos) sobre el rendimiento en grano de maíz y su impacto en el resultado económico del cultivo. Se utilizaron dos máquinas fertilizadoras de origen nacional, Yomel RD 2022 de doble disco bien regulada y mal regulada y Altina LSI 4000 neumática. Se midió la UD de las máquinas según **Figura 1** y se determinó su CV%. Se aplicó 75 kg ha<sup>-1</sup> de urea.



**Figura 3.** Diagramas de caja de los coeficientes de variación (CV%) de la uniformidad de distribución de urea sin superposición de 45 máquinas fertilizadoras antes y después de ser reguladas. Cuadrados negros dentro de las cajas indican el promedio.



**Figura 4.** Diagramas de caja de los coeficientes de variación (CV%) de la uniformidad de distribución de urea con superposición (8%) de 45 máquinas fertilizadoras antes y después de ser reguladas. Cuadrados negros dentro de las cajas indican el promedio.

En la **Tabla 3** se presentan los resultados parciales del trabajo. El uso de la fertilizadora neumática presentó mayor rendimiento de maíz e ingreso neto respecto a la de doble disco independientemente de su regulación cuando se usó el ancho de labor recomendado para urea por el fabricante. Sin embargo, cuando se ajustó el ancho de labor efectivo a 19 m en la doble disco, las diferencias de la doble disco regulada y la neumática no fueron significativas. El menor CV% logrado por la mayor superposición en la doble disco no regulada provocó mejoras en el rendimiento y el ingreso neto. El hecho no de regular la máquina y trabajar con CV% elevado provocó una pérdida de 150 dólares ha<sup>-1</sup>. Este monto es significativo y justifica la inversión en configurar la máquina o adquirir una que permita trabajar con CV% por debajo de 25%.

### Configuraciones deseables al momento de adquirir una máquina fertilizadora de proyección de doble disco

#### Sistemas de distribución

1. Discos cóncavos con un diámetro mayor a 45 cm para lograr un ancho de labor efectivo alto y evitar que se pierda material de su parte superior.
2. Discos con giro solidario de accionamiento hidráulico y velocidad variable regulable.
3. Dos aletas rectas, una corta y una larga con regulación continua de su largo y con contrapeso variable para equilibrar el disco.
4. Punto de caída de fertilizante variable respecto al radio del plato y anteroposteriormente.
5. Altura mínima de los discos: 1 m

#### Sistema de dosificación

1. Tolva de acero inoxidable o plástico de 4500 L o más.
2. Malla agujereada para tamizar el fertilizante al

momento de la carga.

3. Chapa cubre cinta que abarque un 70% de su superficie.
4. Traslado de fertilizante por cinta.
5. Accionamiento hidráulico de la cinta
6. Guillotina con regulación hidráulica o caja escuadra.

### Bibliografía

- Aloe, J. y.; Toribio, M. 2008. Aplicación de fertilizantes sólidos: Regulación de fertilizadoras. Profertil, Departamento de Investigación y Desarrollo. Informe Técnico n° 13. 8p.
- Botta, G., Márquez, L y Dagostino, C. 2001. Máquinas para la fertilización y abonos. En Botta G (ed) Máquinas: series de producción agrícola. 7:1-103
- Carciochi, W.D., Tourn, S. 2016. Características de los fertilizantes y calibración de fertilizadoras. Visión Rural, 114: 21-27.
- Carciochi, W.D.; Tourn, S. 2017. Fertilizantes y calibración de fertilizadoras. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 26: 1-10.
- Cerqueria De Luz, P. 2010. Optimización de la Aplicación Enmiendas y Fertilizantes. Informaciones Agronómicas, 78:1-15.
- Divito, G.A., Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E, Studdert, G.A y Wyngaard, N. 2011. Long term nitrogen fertilization: soil property changes in an Argentinean pampas soil under no tillage. Soil Till. Res. 114(2):117-126.
- Márquez, L. 2011. La tecnología en abonadoras de proyección. Parte 2. Evaluación de las abonadoras en uniformidad de distribución. Agrotécnica 4:3-44.
- Martínez Peck, R. 2007. Regulación de fertilizadoras a platillos. Fertilizar.7:18-22.
- Parish, Richard 2002. Granular Spreaders: Selection, Calibration, Testing and Use. American Society of Agricultural Engineers. 68p.
- Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E. y Angelini, H.P. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana argentina. Ciencia del Suelo. 29(1): 29-37. ◀

**Tabla 3.** Rendimiento e ingreso neto del cultivo de maíz utilizando distintas fertilizadoras con diferentes coeficientes de variación (CV%) y ancho de labor efectivo. DD: doble disco. Letras iguales entre filas en cada sección indican que no hay diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). (Santos y Trueba, 2019, inédito)

Fertilizadora	Ancho de labor (m)	CV%	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Ingreso Neto (U\$S ha <sup>-1</sup> )
Neumática	18	22	12.230 a	1176 a
DD regulada	22	26	11.767 b	1107 b
DD no regulada	22	53	11.309 b	1036 b
Neumática	18	22	12.230 a	1176 a
DD regulada	19	22	12.176 a	1170 a
DD no regulada	19	45	11.207 b	1020 b



# Equipamientos de agricultura de precisión en aplicaciones de fertilizantes

Andrés Méndez<sup>1</sup> y Juan Pablo Vélez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Consultor – <sup>2</sup>EEA INTA Manfredi

andresmendez74@hotmail.com – jpablovelez@gmail.com

## Introducción

Luego de más de 20 años en Argentina con la aparición de equipamientos de agricultura de precisión (AP) es que surgen muchas preguntas a cerca de que tipo de fertilizantes se aplican, en qué condiciones físico-químicas, como se distribuyen estos fertilizantes, con que tipo de equipamientos mecánicos se distribuyen, con que equipamientos electrónicos, que software se utilizan para realizar las prescripciones, que tiempo de reacción entre la lectura de una prescripción o información de lectura de sensores y la aplicación del producto a campo. Otros puntos no menos importantes son el tamaño de la unidad de aplicación, definición de la zona de caracterización, corroboración sobre si la cantidad de fertilizantes para cada zona fue la correcta o hubo déficit o excesos de productos, etc.

En los inicios de la AP aparecían frases para que los lectores comprendamos de que se trataba esta tecnología de aplicación variable de insumos. Una de las explicaciones mencionaba a la Tecnología de Dosis Variable (VRT) que permitía a los agricultores una vez conocido el comportamiento del cultivo en cada sector del lote, calcular las necesidades de insumos en cada zona homogénea más pequeña o subunidad sobre el terreno, y aplicarlos en forma sitio-específica (Bragachini, 2004). Este texto aún es muy vigente y puede decir mucho o no decir nada sobre si se realizan bien o mal las aplicaciones variables por zonas. En la actualidad sigue sucediendo lo mismo, pero se cuenta con información más detallada que permite en la mayoría de los casos empezar a entender mejor el funcionamiento de este sistema de AP y la respuesta de aplicaciones de fertilizantes respecto al suelo y los cultivos.

En los inicios de la aplicación variable de insumos en nuestro país se trataron de forzar a los suelos hacia la caracterización de ambientes diferentes y dentro del análisis de las zonas llevarlas a la menor cantidad posible, forzándolas a comportarse de igual manera, aunque no lo

fueran. A su vez, como el tamaño de la maquinaria y los dispositivos con los que se contaba no eran lo suficientemente precisos, no se podía tratar un determinado tamaño de variabilidad que muchas veces existía en el campo, ej: campos con presencia de tosca. Es así que muchas veces los resultados físicos y económicos de la aplicación variable no daban como los técnicos deseábamos.

Muchas veces, aunque la caracterización estuviese bien hecha también aparecían malos resultados a campo debido a malos productos aplicados o malas condiciones del producto aplicado, malas distribuciones de los fertilizantes, aplicaciones fuera de los límites de los ambientes prescritos, o simplemente que, en la mayoría de los campos, el efecto de la micro-variabilidad ejerce un error complicado de aislar en el análisis de los datos de rendimiento.

En el año 2000, el Dr. Terry Roberts mencionaba lo siguiente a cerca del manejo sitio específico (MSE): *"El concepto de MSE no es nuevo, pero nuevas herramientas de alta tecnología hacen más fácil manejar distintas áreas en los lotes de forma diferencial"* (Roberts et al., 2000). Esta frase sigue siendo muy actualizada solo que el tamaño de esas áreas para nuestro país se vería totalmente modificada respecto a lo que se planteaba en el año 2000 y lo que en la actualidad se empieza a visualizar. Países como Japón captaron este concepto desde hace muchos años atrás y trabajan en un sistema robotizado obviamente porque el tamaño de sus campos es de 5.000 m<sup>2</sup> a no más de 3 hectáreas (Noboru Noguchi, 2005).

En cuanto a la tecnología de AP disponible en Argentina se puede decir que nos encontramos utilizando en gran parte lo mismo que países desarrollados como EE.UU., Australia, Inglaterra o Alemania, entre otros. Pero en lo que respecta a robotización y automatismo de la maquinaria agrícola nos encontramos por debajo en desarrollo de países como pueden ser Japón, Alemania, Inglaterra, Francia, Italia y algún otro país como por ejemplo Chile en algunas producciones.

## Desarrollo de la AP en Argentina sobre maquinaria de fertilización

El modelo elegido para la aplicación de la AP en nuestro país en un inicio fue copiado a EE.UU. en el año 1995/96 y siempre se trataba de adaptar la mejor opción propuesta por empresas, productores o investigadores de las universidades de aquel país. Algunos de los pasos propuestos como así también los equipamientos importados fueron probados en Argentina aplicándose de manera exitosa en gran parte. Pero también otros equipos o pasos de la AP no se aplicaron dado a su menor éxito en cuanto a su adaptación.

Algunos ejemplos de puntos para caracterización de ambientes de un campo en un inicio de la AP fueron cuales eran las herramientas que permitían lograr esa mejor caracterización a menor costo para los productores. De allí surgieron las comparativas entre el dato obtenido de monitores de rendimiento, cartas de suelo, imágenes satelitales, fotografías aéreas, rastras de conductividad eléctrica, radares de suelo, muestreos de suelos en grillas o dirigidos, entre otros. La realidad fue indicando el camino en ese momento y dejando lo que era más práctico y económico para los productores.

Si nos enfocamos en el tema fertilización en AP es interesante destacar que en principio la realización de fertilizaciones variables se realizaba con sembradoras, fertilizadoras con cuerpos para incorporar productos sólidos, fertilizadoras de productos sólidos al voleo o con bajada dirigida por aire, con fertilizantes líquidos inyectadas o por chorreado, entre otros, pero siempre tratando de aplicar variable mediante el uso de prescripciones dirigidas con GPS con previa caracterización de ambientes o mediante respuesta en tiempo real bajo la lectura de sensores como *Green Seeker* pasivos en el inicio y activos posteriormente, donde se mantenían franjas patrón bien fertilizadas para ser comparadas con el resto del cultivo en el lote.

En la actualidad, el modelo existente es muy similar a lo descrito en el párrafo anterior en cuanto al concepto. Las mejoras se dieron en la mayoría de los casos por las experiencias de prácticamente 20 años que permitieron mejorar los análisis y equipamientos que brindan respuestas más rápidas al cambio y estabilización de dosis de fertilizante entre ambientes.

Los cambios de dosis muchas veces, entre que se detecta el ambiente y se logra aplicar lo pres-

cripto (necesario para ese ambiente), demandaba varios segundos y esto causaba una dosis no deseada en ese sector del lote, dejando errores en aplicaciones que luego se expresaban en el rendimiento de los cultivos. Esta problemática se ha ido solucionando con el tiempo y hoy se trabaja con muy buenas precisiones en el mundo.

Se lograron mejorar los equipos de acción (actuadores que reciben la información de los monitores o de sensores en tiempo real), ya sean mecánicos, hidráulicos y/o eléctricos como así también los softwares utilizados logrando una mejor aplicación de fertilizantes en los sitios deseados. La maquinaria a su vez es más específica y se ha logrado robotizar a niveles de controlar metro a metro la aplicación e inclusive a medidas sub métricas.

Muchos factores fueron y son los causantes de malas aplicaciones de fertilizantes. Pero por lo general siempre se toma de ejemplo a las fertilizaciones al voleo como las que mayores problemas causaban en cuanto a distribución del producto en el campo. Argentina ha ido mejorando estos equipos, pero Europa siempre avanza más rápidamente con componentes electrónicos conectados a dispositivos que miden y a su vez pueden cambiar las distribuciones por medio de cambios en la maquinaria en tiempo real. En la **Figura 1** se muestra una deficiente fertilización nitrogenada del cultivo de maíz dada por una mala regulación de la fertilizadora.

En nuestro país, en pulverizadoras se han desarrollado y se están desarrollando equipos que logran conocer y trazar una aplicación que brinda seguridad a los usuarios. La firma *Acronex* ha implementado un sistema de monitoreo (estación meteorológica) en tiempo real que se encuentra conectado a dispositivos de la pulverizadora para indicar si hay riesgos de deriva o malas aplicaciones (<https://www.acronex.com/>). Un sistema similar en Alemania hace varios años se está utilizando para fertilizadoras al voleo donde regula, en tiempo real, el ancho de aplicación según la dirección de los vientos.

Una estación meteorológica montada arriba de la maquinaria y comunicada a un sistema inteligente que puede estar combinado a una cámara filmadora que observe en tiempo real la distribución y a su vez controlando a un sistema mecánico, eléctrico o hidráulico que acciona para hacer cambios en el ancho de aplicación o el ángulo de salida del fertilizante (en lugares

montañosos), sería la solución para mitigar o eliminar esta problemática bastante común y visible en los campos de nuestro país.

Las últimas muestras del sector agropecuario en EE.UU. y Europa mostraron equipos con grandes velocidades de reacción para variar en ambientes contrastantes en cuanto a dosis

aplicadas en muy poco tiempo. También se mostraron dispositivos de control que permiten lograr fertilizaciones tanto de productos sólidos como líquidos muy eficientes y bien distribuidas. Estos serán los cambios a los que nuestro país debe avanzar para lograr una eficiencia global de la fertilización.



Figura 1. Vistas de aplicaciones deficientes de nitrógeno en maíz.



## Futuro de las fertilizaciones con nuevas herramientas de AP

Vale la pena empezar a discutir sobre el sistema agropecuario y si se quiere lograr mejorar, o seguir sin cambios y hacer las cosas de la misma manera. Uno de los puntos seguramente es la fertilización y cómo se está realizando actualmente. Dentro de la fertilización nitrogenada en gramíneas todavía se sigue poniendo sobre la mesa si se hace en el momento oportuno o si se realiza cuando es más simple por logística, aunque no sea lo correcto desde el punto de vista agronómico. Esto seguramente se da por problemas en los tiempos de aplicación porque una máquina no puede hacer 1.000 ha en un día por ejemplo o por el estado de desarrollo de los cultivos que no permite que la maquinaria ingrese sin dañar plantas en momentos avanzados del ciclo entre otros factores.

Otro punto que siempre se pone en discusión suelen ser los métodos de diagnóstico que no terminan de ajustarse nunca ensayo tras ensayo y muchas veces no ajustan a la realidad de lo aplicado en el campo en fertilizantes. Conjuntamente con esto la dependencia del año si es húmedo o es seco y la respuesta en el rendimiento que ello causa. Son todas situaciones del día a día que con información diaria obtenida por diferentes métodos y aplicando con equipamientos robotizados podría lograrse mejorar.

Hoy se encuentran algunas herramientas que permiten un mejor ajuste y que pueden predecir con mayor exactitud las necesidades de los cultivos en diferentes tipos de insumos. La combinación de imágenes satelitales de varios satélites, más imágenes obtenidas desde un dron para tomarlo como muestra comparativa de ajuste a las imágenes satelitales, tomando datos de estaciones meteorológicas en ese lugar y ajustando a modelos de elevación de suelos, está logrando un ajuste casi perfecto en momentos tempranos de algunos cultivos como, por ejemplo, maíz y trigo. Además, hacen un ajuste matemático con datos climáticos para predecir luego del momento en que las imágenes se saturan. En EE.UU. algunas empresas proveen imágenes satelitales prácticamente todos los días y es como ver crecer a los cultivos, lo que permite detectar problemas de enfermedades o deficiencias de nutrientes muchos días antes que el ojo humano lo pueda observar, por ejemplo.

Este modelo empieza a tener gran cantidad

de datos que hoy son posibles de analizar con una lógica algo más simple, porque se ha logrado tener una continuidad de puntos de un mismo lugar en el tiempo. Lo que colabora no solo a mejorar las aplicaciones de insumos, sino que también logra tener una trazabilidad de la producción primaria que será necesaria para poder lograr precios mayores a los que cotizan los *commodities* en EE.UU.

Teniendo en cuenta como avanzan las herramientas y las posibilidades tecnológicas es que se empieza a visualizar un futuro virtual interconectado y robotizado en la producción agrícola. Donde una imagen satelital puede ser el disparador para que un robot sea por aire o por tierra, salga a cumplir la recomendación del tratamiento que se le indica y luego vuelva a su base.

Seguramente estos robots podrán hacer una agricultura a su vez más versátil y con menores costos de mantenimiento que la maquinaria actual. Hoy los contratistas rurales están pasando por un momento muy complicado respecto a poder amortizar la maquinaria de trabajo.

Existen herramientas de trazabilidad y como ejemplo se puede citar solo una compañía que adquirió *Trimble* (<https://www.harvestmark.com>), que tiene más de 400 empresas como clientes. Hoy la industria alimentaria se está transformando por las demandas de mayor transparencia, calidad y seguridad, creando oportunidades para proporcionar un análisis significativo de los alimentos desde el campo a la mesa. Estos sistemas pueden marcar claramente diferencias de precios para los productores dado que los consumidores pagan por ello.

## Conclusiones

El futuro de la AP producirá cambios que serán muy flexibles para poder virar constantemente de un sistema de producción a otro, siempre y cuando se empiece a trabajar en el concepto de micro variabilidad de suelos y el tratamiento correcto que eso implica.

El avance en la periodicidad e información de las imágenes satelitales, la mayor velocidad de análisis de datos que antes no se contaba con las computadoras existentes, la oferta en maquinaria agrícola que permite hacer cambios en pocos centímetros y la amplitud mental de quienes desarrollan tecnología que hacen posible lo que hace 6 meses no era posible es realmente



desafiante para todos los sectores productivos del mundo.

Hoy es necesario que las empresas argentinas empiecen a desarrollar este tipo de equipos robotizados dado que seguramente son el futuro de la agricultura de nuestro país y del mundo. La empresa *Plantium Gentec* de nuestro país posee un prototipo de robot eléctrico que puede servir de plataforma para colocarle un barral fertilizador pulverizador, cuerpos fertilizadores o bajadas de fertilizante entre otros.

El contratista argentino puede empezar a mutar de maquinaria clásica a maquinaria robotizada como sucede en algunos países de Europa donde el dueño de estos equipos viaja con su camioneta y acoplado con varios robots que son manejados desde su celular.

## Bibliografía

**Noboru Noguchi.** 2005. Japan Agriculture based on Robot Farming System et al. 155-160 20. INTA Manfredi. [file:///C:/Users/Andr%C3%A9s%20M%C3%A9ndez/Downloads/19-Japan\\_Agriculture\\_Robot-Noguchi.pdf](file:///C:/Users/Andr%C3%A9s%20M%C3%A9ndez/Downloads/19-Japan_Agriculture_Robot-Noguchi.pdf)

**Roberts T. et al.** 2000. Manejo Sitio Específico de Nutrientes - Avances en Aplicaciones con Dosis Variable. <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/dosis-variable/Manejo-Nutrientes-Sitio-Especifico.asp>

**Bragachini M.** 2004. Manejo de cultivos por ambiente y evolución de la dosificación variable en Argentina. <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/dosis-variable/Manejo-Cultivo-Por-Ambiente-Evol-Dosificacion-Var.asp> ◀



# Llevando la agricultura de precisión al lote

Agustín Pagani

Clarion, 9 de Julio, Buenos Aires

apagani@precisionclarion.com

## Introducción

La adopción de tecnologías de agricultura de precisión referidas al manejo de nutrientes ha ganado popularidad en los últimos años en la Argentina (Melchiori et al., 2018). Su objetivo principal ha sido el de aumentar la eficiencia en el uso de los nutrientes mediante herramientas de diagnóstico y técnicas de aplicación que contemplen la variabilidad espacial de los lotes de producción, la variabilidad temporal (o interanual) y la interacción entre ambas. Esta incorporación tecnológica ha sido motivada por una mayor oferta de herramientas mecánicas e informáticas, pero también por una mayor disponibilidad de información para los productores y técnicos sobre cómo utilizarlas satisfactoriamente. El objetivo de este resumen es presentar algunos conceptos y experiencias en investigación y producción relacionadas al manejo sitio-específico de nutrientes en cultivos extensivos como herramientas para una agricultura más eficiente, más rentable y sustentable.

## Manejo sitio-específico de nitrógeno

El manejo del N en sistemas agrícolas presenta una elevada complejidad debido al número de factores que intervienen en la dinámica de este nutriente en el sistema suelo-planta-atmósfera (Havlin et al., 2005). Esto es particularmente cierto en regiones húmedas o de pluviometría variable como gran parte de la región pampeana argentina, donde la oferta de N del suelo y la demanda potencial de este nutriente por parte del cultivo se modifican consistentemente de un año a otro en función de las condiciones ambientales. A su vez, estudios nacionales han demostrado como las variaciones en las propiedades edáficas y topográficas a nivel intra-lote determinan que el nivel óptimo de fertilizante nitrogenado a aplicar varíe espacialmente de manera considerable (Gregoret et al., 2011; Peralta et al., 2013; Puntel et al., 2019). En estas condiciones, el manejo tradicional de N con dosis uniforme puede derivar en la subfertilización en algunas

áreas y sobrefertilización en otras (Scharf et al., 2005). En este sentido, numerosos trabajos han establecido que el manejo sitio-específico de N puede aumentar la rentabilidad de la producción de cereales, donde la variabilidad en las propiedades edáficas y topográficas lo justifican (Mamo et al., 2003; Ferguson et al., 2007). Por otro lado, existen evidencias que muestran que la tecnología de dosis variable permite además reducir el impacto ambiental de la fertilización nitrogenada (Basso et al., 2016).

En un estudio realizado en campos de productores del centro-oeste bonaerense durante el período 2012-2018 para los cultivos de maíz (Puntel et al., 2019) y trigo (datos no publicados) se evaluaron múltiples factores estáticos y dinámicos como predictores de la variabilidad espacio-temporal del rendimiento de ambos cultivos, la respuesta a N y la dosis óptima económica (DOE) de este nutriente. Específicamente, se establecieron experimentos en microparcelas con dosis crecientes de N (0 a 250 kg/ha) y tres repeticiones en posiciones en el relieve y tipo de suelo contrastantes dentro de los lotes de producción y se ajustaron curvas de respuesta a la fertilización nitrogenada para poder estudiar la variación de la DOE de N en el tiempo y en el espacio. Estos lotes, a su vez, fueron caracterizados espacialmente mediante relevamientos de elevación, conductividad eléctrica aparente (ECa), derivados topográficos, profundidad de napa, disponibilidad de agua y N a la siembra, textura y materia orgánica del suelo, rendimiento de años anteriores, profundidad efectiva y precipitaciones acumuladas en períodos específicos. El objetivo fue estudiar qué variable o combinación de variables no deberían descuidarse como criterios para generar una prescripción de N con dosis variable.

Considerando los cinco años de este estudio y al igual que lo ampliamente reportado en la bibliografía internacional para el cultivo de maíz (Raun et al., 2010; Arnall et al., 2013), el rendimiento al nivel óptimo de N no fue un buen indicador de la DOE (Figura 1), lo que significa que no necesariamente los años y áreas dentro de los lotes con mayor productividad fueron los

que requirieron mayor aporte de N mediante la fertilización. Por otro lado, la DOE de N se relacionó de forma negativa, aunque muy débilmente ( $R^2 = 0.21$ ), con el rendimiento del testigo sin N (Figura 1), indicando que los niveles óptimos de N tendieron a incrementarse cuando y donde el aporte de N del suelo fue menor, o se dieron condiciones de pérdidas de N del sistema por lavado y desnitrificación. Sin embargo, la DOE se relacionó positiva y muy estrechamente ( $R^2 = 0.91$ ) con la respuesta máxima a la fertilización (diferencia entre el rendimiento a la DOE y el rendimiento del testigo sin N, Figura 1), sugiriendo la importancia de la integración conjunta de la oferta de N del suelo y de la demanda de N por parte del cultivo (en función de la potencialidad de rendimiento

del ambiente) para establecer una estrategia de manejo de N con dosis variable. La bibliografía internacional señala la importancia de desarrollar modelos predictivos de la respuesta a la fertilización como indicador principal de la DOE para este cultivo (Lory y Scharf, 2003; Sawyer et al., 2006; Raun et al., 2010; Arnall et al., 2013).

A diferencia de lo encontrado para maíz, en los ensayos de trigo se observó que el nivel de rendimiento sin limitaciones de N fue un indicador parcial de la variabilidad espacio-temporal de la DOE ( $R^2 = 0.51$ ), lo que indica una tendencia de que los niveles óptimos de fertilización nitrogenada deberían elevarse a medida que lo hace el nivel de rendimiento del ambiente, pero no se determinó relación alguna entre la DOE y el ren-

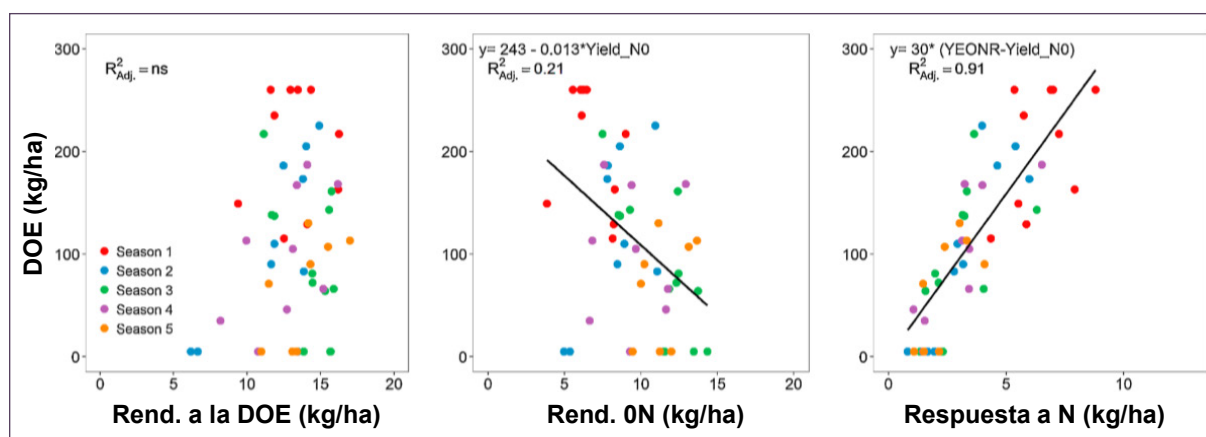


Figura 1. Dosis óptima económica de nitrógeno (DOE N) para el cultivo de maíz en función del rendimiento a la DOE, el rendimiento del testigo sin N y la respuesta máxima a la fertilización nitrogenada. Información proveniente de 53 ensayos en microparcelas ubicados en diferentes tipos de suelo y posiciones en el relieve dentro de lotes del partido de 9 de Julio durante el período 2012-2017. Adaptado de Puntel et al. (2019).

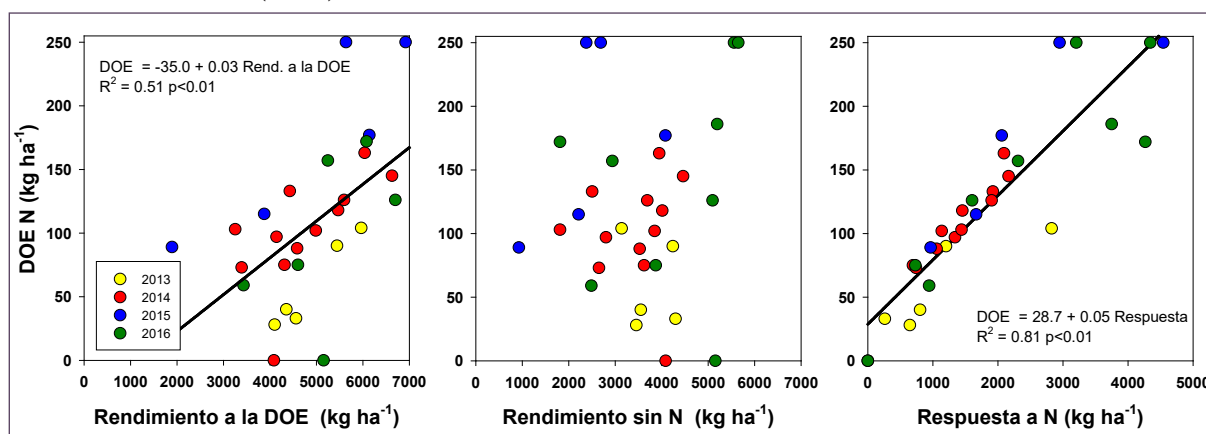
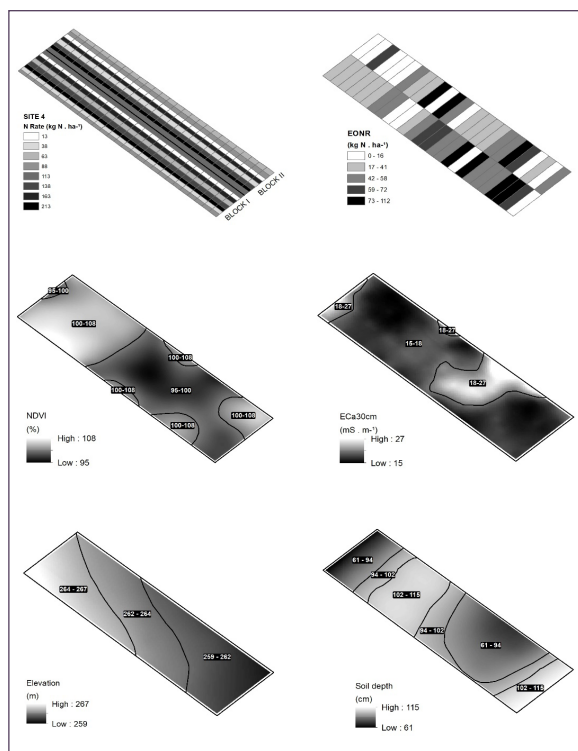


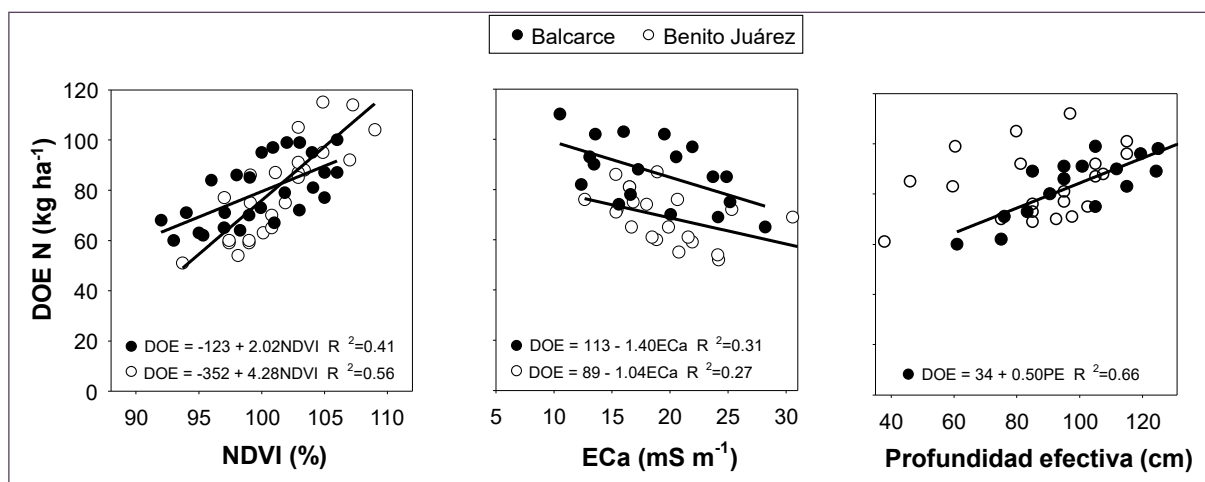
Figura 2. Dosis óptima económica de nitrógeno (DOE N) para el cultivo de trigo en función del rendimiento a la DOE, el rendimiento del testigo sin N y la respuesta a la fertilización nitrogenada. Información proveniente de 33 ensayos en microparcelas ubicados en diferentes tipos de suelo y posiciones en el relieve dentro de lotes del partido de 9 de Julio durante el período 2013-2016. Datos no publicados.



**Figura 3.** Esquema de uno de los ensayos en franja con dosis crecientes de nitrógeno (N) conducidos en el sudeste y noroeste bonaerense durante el período 2013 a 2017 donde se observa la variabilidad espacial de la dosis óptima de nitrógeno (DOE N) a nivel de celda y los diferentes criterios de delineación de zonas de manejo de N que fueron evaluados.

diminución del testigo sin N (**Figura 2**). Sin embargo, cuando la oferta y demanda de N fueron consideradas de manera conjunta a través del análisis de la respuesta máxima a la fertilización (**Figura 2**), se observó una estrecha relación entre esta variable y la DOE ( $R^2=0.81$ ), de manera similar a lo obtenido para el cultivo de maíz.

Estos resultados para ambos cultivos sugieren la importancia de contemplar la oferta y demanda de N en forma integrada a la hora de generar una prescripción de fertilización nitrogenada con dosis variable ya que la cuantificación de la demanda en forma aislada (como por ejemplo, el uso de mapas de rendimiento de años anteriores o de imágenes multiespectrales que se correlacionen con productividad vegetal) puede no ser estrategias acertadas para separar áreas dentro del lote con diferentes requerimientos de N (especialmente para maíz). Por otro lado, la cuantificación de la oferta de N en forma individual (como el análisis de N inorgánico inicial o algún índice de mineralización de N) ignorando el potencial de rendimiento del ambiente tampoco parecería ser un planteo recomendable en regiones con pluviometría variable donde las pérdidas de N del sistema pueden ser importantes. En este sentido estudios internacionales sugieren que aquellas recomendaciones de fertilización que ignoran por completo el potencial de rendimiento del ambiente están sujetas a un 50% de éxito en el mejor de los casos (Lory y Scharf, 2003; Raun et al., 2010).



**Figura 4.** Dosis óptima económica de nitrógeno (DOE N) para el cultivo de maíz en función de: i) el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivos anteriores, ii) la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo medida a 30 centímetros de profundidad con la rastra Veris 3100, y iii) la profundidad efectiva de suelo. Información proveniente de nueve ensayos en franja con dosis crecientes de N en lotes del partido de Balcarce y Benito Juárez durante las campañas 2013/14 y 2014/15. Adaptado de Arana (2018).



Con el objetivo de comparar criterios de caracterización ambiental para el manejo sitio-específico de las necesidades de N para el cultivo de maíz se llevaron a cabo dos proyectos de investigación en campos de productores, uno en el sudeste bonaerense (partidos de Balcarce y Benito Juárez) durante las campañas 2013/14 y 2014/15 (Arana, 2018) y el otro en el noroeste de la provincia de Buenos Aires (partidos de Villegas y Ameghino) durante las campañas 2015/16 y 2016/17 (Girón et al., datos no publicados). En ambos casos se condujeron ensayos en franja (**Figura 3**) con cinco a ocho dosis de N (de 0 a 200 kg N ha<sup>-1</sup>) atravesando la variabilidad de nueve lotes comerciales en el sudeste y diez en el noroeste bonaerense. Estos lotes fueron caracterizados espacialmente mediante el análisis de imágenes satelitales y mapas de rendimiento de cultivos anteriores, elevación, conductividad eléctrica aparente (CEa) y profundidad efectiva del suelo (tosca en el sudeste y horizonte thapto en el noroeste) siguiendo una metodología similar a la empleada en varios trabajos previos (Wibawa et al., 1993; Franzen et al., 1998; Scharf et al., 2005).

En el estudio realizado en el sudeste bonaerense (Arana, 2018), condiciones de estrés hídrico y térmico restringieron el rendimiento del cultivo y la respuesta a la fertilización nitrogenada en ambas campañas. En general, todos los criterios de delineación de zonas de manejo se mostraron efectivos para explicar el rendimiento del cultivo a nivel intra-lote, sin embargo, su capacidad para explicar la variación espacial de la respuesta a N y la DOE fue diferente dependiendo del criterio empleado. Agrupando todos los sitios se observó que el rendimiento del cultivo, la respuesta a N (datos no mostrados) y la DOE (**Figura 4**) tendieron a aumentar a medida que lo hicieron el índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivos anteriores y la profundidad efectiva del suelo, pero disminuyeron a medida que aumentó la ECa del suelo. Estas tres variables asociadas a la potencialidad del ambiente (demanda de N) más que a la capacidad del suelo de aportar N (oferta de N), fueron los indicadores que mejor explicaron las variaciones de la DOE dentro de estos lotes, por lo que deberían ser tenidas en cuenta en la delineación de zonas de manejo de N en el sudeste bonaerense, al menos en campañas de escasas precipitaciones como las de este estudio.

En el estudio llevado a cabo en el noroeste bonaerense (Girón et al., datos no publicados) usando la misma metodología, se presentaron condiciones de abundantes/excesivas precipitaciones durante ambas campañas, lo que derivó en altos rendimientos máximos, pero también condiciones predisponentes para la ocurrencia de pérdidas de N del sistema. En dicho estudio, considerando solo los tres sitios de mayor contenido de arena y heterogeneidad topográfica, la elevación del terreno fue el mejor criterio para separar zonas dentro del lote con rendimientos contrastantes independientemente del nivel de N aplicado. Para estos sitios, el rendimiento del cultivo disminuyó a medida que aumentó la elevación del terreno (**Figura 5**). Sin embargo, la elevación no fue un criterio efectivo para explicar variaciones a nivel intra-lote de la respuesta a N o la DOE (**Figura 5**), ya que ambas fueron altas y generalizadas (situación típica de lotes arenosos ante condiciones hídricas muy favorables o excesivas).

Por el contrario, agrupando los sitios más planos de textura más fina y con presencia de horizonte thapto en determinada porción del lote, se observó una relación significativa entre el rendimiento del testigo sin N, la respuesta a la fertilización nitrogenada y la DOE N con la CEa del suelo medida con la rastra Veris 3100 (**Figura 6**). En estos sitios, el rendimiento del testigo sin N disminuyó a medida que aumentó la ECa a 90 cm de profundidad, sugiriendo la ocurrencia de mayores pérdidas de N en las zonas de alta ECa asociadas a la presencia de horizontes thapto que permanecieron encharcadas por más tiempo en campañas de abundantes precipitaciones. Por esa razón, la respuesta a N y DOE N aumentaron a medida que lo hizo la ECa del suelo (**Figura 6**). Estos resultados sugieren una mayor capacidad de variables asociadas a la oferta de N del suelo para explicar las variaciones espaciales de la DOE N en años húmedos como los que se dieron en este estudio. En estas condiciones, y a diferencia de lo observado en el estudio del sudeste en condiciones de precipitaciones escasas, la demanda de N asociada al potencial de rendimiento del cultivo tiene poca capacidad de explicar la variabilidad espacial de la DOE N ya que es alta y generalizada en todo el lote cuando el agua deja de ser el factor más limitante.

Estas experiencias realizadas en zonas diferentes de la región pampeana sugieren la importancia de emplear modelos integrados para la fertilización nitrogenada con dosis variable. Por lo

expuesto, queda claro que cualquier herramienta o algoritmo adoptado como base para generar una prescripción de fertilización nitrogenada debería integrar factores asociados a la demanda de N por parte del cultivo como disponibilidad de agua, presencia de napa o textura y materia orgánica del suelo (o índices que se correlacionen con estas propiedades como la elevación y la ECa), así como también indicadores de la oferta de N del suelo como el N inorgánico inicial o el potencialmente mineralizable durante la estación de crecimiento. Si bien oferta y demanda deberían ser consideradas en forma conjunta, la investigación sugiere que la importancia relativa de cuantificar la demanda de N sería mayor en años de bajas precipitaciones, mientras que la cuantificación de la oferta de N del suelo cobraría mayor importancia relativa para definir la DOE N en años de precipitaciones abundantes o excesivas.

## Manejo sitio específico de fósforo

En general, el manejo del fósforo (P) presenta menor complejidad que el manejo del N, particularmente en regiones con suelos poco fijadores de P como los de la región templada argentina. Esto se debe a que las necesidades de P por parte de un cultivo determinado interactúan relativamente poco con el clima, suelo y nivel de rendimiento (Havlin et al., 2005). A diferencia del caso del N, en general los umbrales críticos de P (valor de concentración de P en el suelo por encima del cual la probabilidad de respuesta es muy baja o nula) son relativamente estables ante variaciones en las condiciones de crecimiento del cultivo (Gutiérrez Boem y Salvagiotti, 2014; Wortmann et al., 2018). Además, debido a la residualidad de la fertilización fosforada en suelos poco fijadores, la determinación de la dosis de P a aplicar no es un aspecto tan crítico en el corto

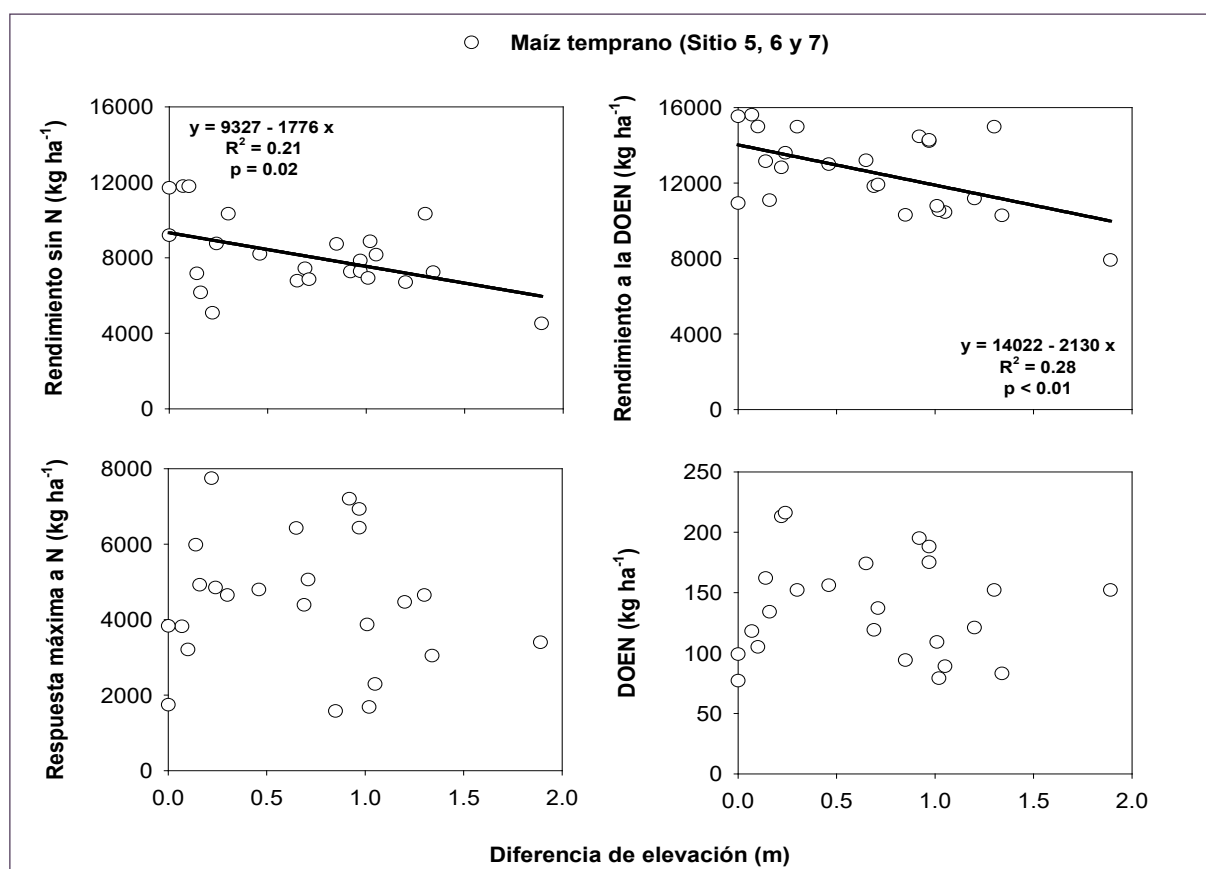


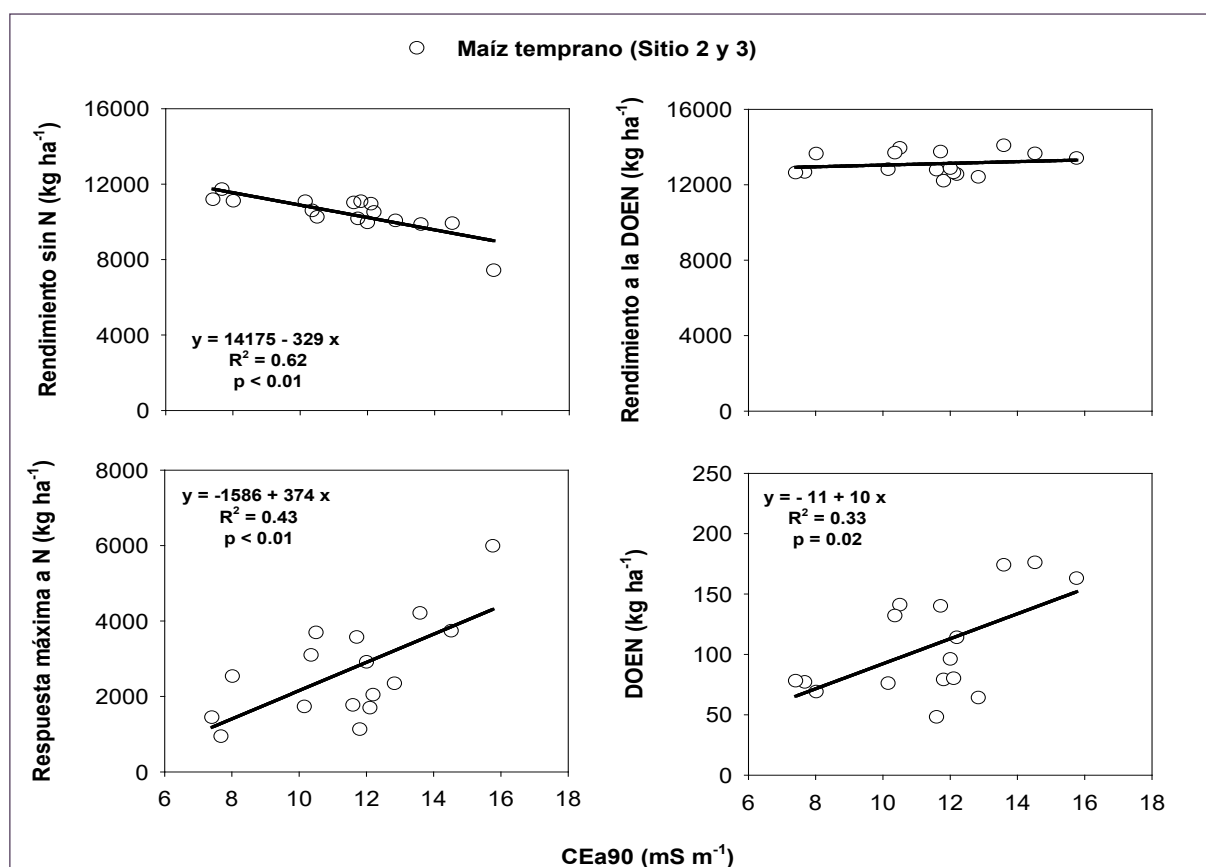
Figura 5. Rendimiento de maíz sin el agregado de nitrógeno (N), rendimiento a la dosis óptima económica (DOE N), respuesta a la fertilización y DOE N en función de la elevación del terreno (expresada como diferencia respecto al punto más bajo del lote). Información proveniente de ensayos en franja con dosis crecientes de N en tres lotes (con presencia de lomas arenosas) del partido de General Villegas durante las campañas 2015/16 y 2016/17.

plazo como lo es para el N. Siempre y cuando las necesidades de P de un cultivo sean satisfechas, moderados excesos en el P aplicado no representan reducciones importantes en la eficiencia de la fertilización ya que dichos excesos quedan disponibles para futuros cultivos.

Sin embargo, cuando se considera la variabilidad espacial de la disponibilidad de P para los cultivos, el manejo de este nutriente se complejiza significativamente. Esto se debe a que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo pueden producir variabilidad tanto en rendimiento y exportación de P por parte de los cultivos, como en el P disponible para la planta afectando la cantidad total de P en el suelo, la fracción de P disponible para el cultivo y las posibles pérdidas del sistema (Mulla y Schepers, 1997). La variabilidad en las propiedades del suelo puede ocurrir en varias escalas, desde centímetros a escalas regionales, pero es de

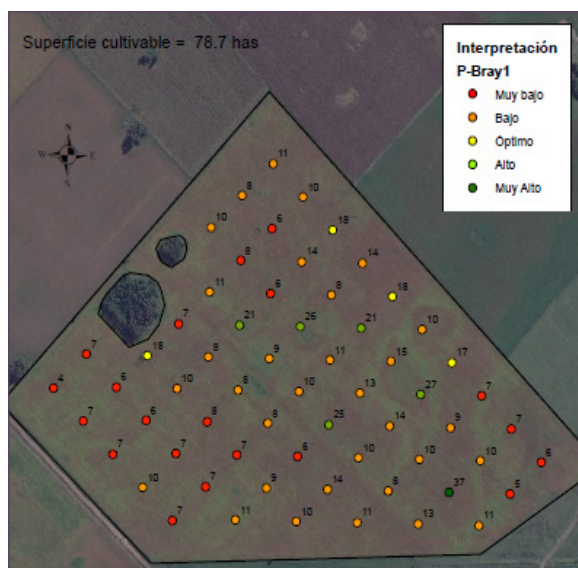
especial interés para el manejo variable de P, la que ocurre a nivel intra-lote. Particularmente, la variabilidad del nivel de P en el suelo puede ser muy alta aún dentro de campos que parecen ser uniformes en otras propiedades del suelo (Mallarino et al., 1999) y tiende a ser todavía más alta en lotes con varios años de agricultura y ganadería, sobre todo con extensa historia de fertilización y aplicación de enmiendas (Mallarino y Wittry, 1998; Kravchenko y Bullock, 2000). Por lo tanto, con muy pocas excepciones, los lotes de producción presentan áreas donde los cultivos requieren la aplicación de P y áreas donde no se requiere fertilizar o el requerimiento es significativamente menor.

El muestreo y análisis de suelo es el primer paso para iniciar una estrategia de manejo variable de P. En este sentido, existen diferentes esquemas de muestreo para coleccionar las muestras de P de un lote. Tradicionalmente, la recomendación



**Figura 6.** Rendimiento de maíz sin el agregado de nitrógeno (N), rendimiento a la dosis óptima económica (DOE N), respuesta a la fertilización y DOE N en función de la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo medida a 90 centímetros de profundidad con la rastra Veris 3100. Información proveniente de ensayos en franja con dosis crecientes de N en dos lotes (planos y con presencia de horizonte thapto) del partido de General Villegas durante las campañas 2015/16 y 2016/17.

de muestreo de suelo para el diagnóstico de P a nivel mundial ha sido un método de muestreo de suelo basado en la topografía, mapa de suelo o manejo previo, tomando una muestra compuesta de 12 a 15 submuestras colectadas al azar de cada área de muestreo. En América del Norte y ciertas regiones de Europa, el reconocimiento de una alta variabilidad en los niveles de P no asociada con el tipo de suelo o topografía llevó al uso del muestreo en grilla para caracterizar esta variabilidad (Franzen y Peck, 1995; Lauzon et al., 2005). Este tipo de muestreo consiste en subdividir sistemáticamente un lote en áreas pequeñas o celdas y de cada una de éstas se extrae una muestra compuesta de 6 a 12 submuestras. Inicialmente se colectaban las submuestras de toda el área de cada celda, ya sea siguiendo un modelo sistemático o al azar, y a este método se lo denominó "muestreo de grilla-celda". Más tarde, se comenzaron a tomar las submuestras de áreas pequeñas (50 a 150 m<sup>2</sup>) localizadas cerca del centro de cada celda o de modo aleatorio, dándole el nombre de "muestreo de grilla-puntos". Los valores de los análisis de suelo obtenidos por el muestreo en grilla se los puede expresar directamente en un mapa para representar las celdas como tales (cuadrícula); o bien pueden usarse para interpolación de un mapa más denso y suavizado por medio de varios métodos estadísticos.



**Figura 7** Ejemplo de un lote muestreado en grilla y ubicación geográfica de los 175 lotes. Algunos puntos representan más de un lote cuando estos se encontraban muy próximos entre sí.

La intensidad de muestreo en grilla requerida para una prescripción efectiva con dosis variable es diferente para cada lote o región geográfica. No obstante, se ha encontrado que, si el muestreo de P se realiza con grillas muy grandes, se pueden encontrar bajas correlaciones cuando los resultados se comparan con muestreos en grilla de menor tamaño. Por consiguiente, las interpolaciones que se realizan para lograr mapas de prescripción de P pueden resultar inadecuadas dando lugar a recomendaciones de fertilidad erróneas (Mallarino y Wittry, 2004).

Con el fin de evaluar la conveniencia económica del muestreo de suelo en grilla en la región pampeana argentina, se realizó un estudio de 175 lotes de producción. Estos lotes fueron muestreados en grillas alineadas con una intensidad de 1 muestra (compuesta por 10 submuestras a 20 centímetros de profundidad) cada 1 ha o 1.6 has dependiendo del sitio (**Figura 7**). Las muestras de suelo fueron secadas, molidas, tamizadas y analizadas para fósforo disponible, materia orgánica y pH (NCR-13 No. 221).

Se utilizó la información publicada (Tellería et al., 2016; Chacra Experimental Bellocq, datos no publicados; Correndo, 2018) para simular la respuesta del rendimiento del maíz, el trigo y la soja a la fertilización fosforada empleando i) una dosis uniforme de 20 kg P/ha (muy frecuentemente empleada en la región pampeana) o ii) una dosis variable para cada celda de la grilla siguiendo las recomendaciones publicadas en Echeverría y García (1998). Se asumió como fuente de P el súper fosfato triple (430 US\$/ton) y se consideraron los siguientes precios para maíz, trigo y soja: 150, 200 y 250 US\$/ton, respectivamente. A dichos precios se les descontaron los gastos de flete y comercialización, y se calculó el margen bruto (MB) por hectárea para cada lote y cultivo asumiendo una fertilización con dosis uniforme y variable.

Los lotes muestreados presentaron diferentes niveles de variabilidad espacial en la disponibilidad de P con desvíos estándar que variaron entre 1.5 y 23 ppm y rangos entre 3 y 43 ppm (datos no mostrados), lo que representa una condición característica de la región pampeana Argentina. Los resultados de estas simulaciones muestran que la fertilización variable presentó un MB significativamente mayor que el de la fertilización con dosis uniforme (**Figura 8**) y su impacto económico fue mayor para el trigo (incremento de MB/ha promedio de 39 US\$/ha) y algo menor para el



maíz y la soja (30 y 27 US\$/ha, respectivamente), lo que puede explicarse por los diferenciales niveles de respuesta y umbrales críticos normalmente observados para estos tres cultivos (Echeverría y García, 1998; Correndo, 2018). Cabe aclarar que este aumento simulado de MB se compone de ahorro de fertilizante y/o aumento en la respuesta a P y solo contempla efectos de corto plazo, ignorando la residualidad de la fertilización y las

ventajas para el sistema que la dosis variable de largo plazo provoca al disminuir la variabilidad de P en el suelo (Mallarino y Wittry, 2004). Si bien este análisis representa una simple simulación utilizando supuestos publicados en la bibliografía nacional, los resultados obtenidos se consideran orientativos de la rentabilidad de corto plazo (1 año) de la fertilización con dosis variable respecto a un planteo tradicional con dosis uniforme.



**Figura 8.** Incremento de margen bruto por hectárea estimado de la fertilización variable con P respecto a un planteo de fertilización con dosis uniforme para maíz, trigo y soja. Dichos incrementos se componen en ahorro de fertilizante y aumento adicional de producción.

## Manejo sitio-específico de otros nutrientes y enmiendas

El conocimiento disponible respecto al manejo de azufre (S) con dosis variable no es abundante. Sin embargo, existen algunos estudios que indican variabilidad espacial en la respuesta de los cultivos a la aplicación de S según ciertos atributos del paisaje y/o suelo. Por ejemplo, en un trabajo realizado por la Universidad de Minnesota en EE.UU. se determinó, a través de ensayos en franja atravesando la variabilidad espacial de cuatro lotes, que el cultivo de maíz respondía significativamente al agregado de S cuando el nivel de materia orgánica del suelo era menor a 2%, pero la probabilidad de respuesta bajaba en el rango de materia orgánica de 2% a 4%, para hacerse nula a valores de materia orgánica superiores a 4% (Kaiser et al., 2010). En este estudio se concluyó que la aplicación variable de S podría incrementar la rentabilidad de la fertilización azufrada en regiones con marcada variabilidad espacial. En la Argentina el manejo del S generalmente se hace en combinación con el P o N por lo que frecuentemente resulta complejo hacer coincidir los criterios sobre los cuales basar la fertilización variable.

El manejo de enmiendas básicas (encalado) con dosis variable es otra tecnología con gran potencial en la Argentina. Como es ampliamente conocido, la agricultura intensiva está provocando un paulatino incremento de los niveles de acidez de los suelos (Sainz Rozas et al., 2010) por lo que es probable que empiecen a observarse respuestas al encalado en cultivos agrícolas de forma más generalizadas como las reportadas en otras regiones (Pagani y Mallarino, 2015). En este sentido, es esperable que los requerimientos de encalado varíen espacialmente dentro de lotes de producción con heterogeneidad espacial en el pH del suelo, su capacidad buffer y/o potencial de rendimiento (asociado a exportación de bases).

De la misma manera, existen algunas experiencias en producción que señalan ventajas de la corrección de suelos sódicos mediante el enyesado en planteos agrícolas y ganaderos. Por esta razón, y teniendo en cuenta la heterogeneidad de la distribución del sodio dentro de los lotes, el enyesado con dosis variable sería la mejor forma de abordar el problema. Herramientas de caracterización ambiental como la CEa han demostrado ser de alta utilidad debido a que presenta una alta correlación con la salinidad

del suelo (Williams y Baker, 1982).

La información expuesta en esta sección, representa algunos ejemplos de cómo el uso de la tecnología de aplicación variable se está expandiendo a otros nutrientes y enmiendas. En el futuro se espera que el uso de estas herramientas también se haga extensivo a otros nutrientes y enmiendas en la medida que se demuestre un beneficio concreto por su implementación.

## Conclusión

Por lo expuesto en este resumen, queda claro que el manejo sitio-específico de nutrientes tiene la potencialidad de aumentar la eficiencia de uso de nutrientes, los rendimientos de los cultivos y la rentabilidad del productor, respecto al manejo convencional. A su vez, se presenta como una herramienta efectiva para minimizar los problemas de contaminación ambiental asociados a la fertilización de cultivos. No obstante, también es evidente que la implementación de esta estrategia de manejo requiere de mayor inversión, capacitación y laboriosidad, respecto al manejo de nutrientes convencional. Además, es importante destacar que la conveniencia de un planteo de manejo de nutrientes sitio-específico no es uniforme a través de todas las condiciones de producción, si no que varía entre regiones, lotes, cultivos y productores. Sin embargo, considerando la extensa variabilidad espacial de las características edáficas, en la mayoría de los lotes de producción es intuitivo que un manejo nutricional que permita contemplar dicha variabilidad presente ventajas sobre un manejo espacialmente rígido. En la actualidad se cuenta con la tecnología para maximizar las ventajas productivas asociadas a un manejo de nutrientes sitio-específico y la investigación a nivel nacional va paulatinamente cubriendo esta demanda de información.

## Bibliografía

- Arana, E.D. 2018. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el sudeste bonaerense. Tesis Magister Scientiae, FCA-UNMP. Mayo 2018.
- Arnall, D. B. A. P. Mallarino, M. D. Ruark, G. E. Varvel, J. B. Solie, M. L. Stone, J. L. Mullock, R. K. Taylor y W. R. Raun. 2013. Relationship between grain crop yield potential and nitrogen response. *Agron. J.* 105:1335–1344.
- Basso, B., B. Dumont, D. Cammarano, A. Pezzuolo, y F. Marinello, L. Sartori. 20016. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen

- fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Sci. Total Environ.* 545-546:227-35.
- Correndo, A.** 2018. Variables asociadas a la respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en maíz y soja en región pampeana. Tesis M.S. EPG FAUBA. Julio 2018.
- Echeverría H. y F. García.** 1998. Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce.
- Ferguson, R., A. Dobermann, y J. Schepers.** 2007. Site-specific nitrogen management for irrigated corn. University of Nebraska extension publication. EC163. University of Nebraska-Lincoln.
- Franzen, W.D., y T.R. Peck.** 1995. Field soil sampling density for variable rate fertilization. *J. Prod. Agric.* 8:568-574.
- Franzen, D., Reitmeier, L., Giles, J. y A. Cattanach.** 1998. "Aerial photography and satellite imagery to detect deep soil nitrogen levels in potato and sugar beet," En: Robert, P., Rust, R. and W. Larson, eds., *Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture*. St. Paul, MN, July 19-22, 1998. (ASA-CSSASSA, Madison, Wisconsin, 1999), p. 281-290.
- Gregoret, M.C., M. Díaz Zorita, J. Dardanelli, y R. G. Bongiovanni.** 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis. Agric.* 12:831-849.
- Gutierrez Boem, F.H. y F. Salvagiotti.** 2014. Soja. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) 'Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos', 2ª ed., Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 479-508, ISBN 978-987-521-565-8.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson.** 2005. Soil fertility and fertilizers. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. p. 515.
- Kaiser, D.E., J.A. Lamb y K. Kim.** 2010. Response to starter applied sulfur in combination with nitrogen and phosphorus across a landscape. p.66-73 En. *Proc. 40th annual North Central Extension Industry Soil Fertility Conference*. Nov. 17-18 Des Moines, IA.
- Kravchenko, A.N. y D.G. Bullock.** 2000. Correlation of grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-83.
- Lauzon, J. D., I. P. O'Halloran, D. J. Fallow, A. P. von Bertoldi, y D. Aspinall.** 2005. Spatial variability of soil test phosphorus, potassium, and pH of Ontario soils. *Agron. J.* 97:524-532.
- Lory, J.A. y P.C. Scharf.** 2003. Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn. *Agron. J.* 95: 994-999.
- Mallarino, A.P. y D.J. Wittry.** 1998. Soil sampling strategies for variable rate P and K fertilization and liming. p. 251-256. En *The Integrated Crop Management Conference. Proceedings*. Nov. 17-18, 1998. Iowa State Univ. Extension. Ames.
- Mallarino, A.P., E.S. Oyarzabal y P.N. Hinz.** 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precis. Agric.* 1:15-25.
- Mallarino, A.P. y D.J. Wittry.** 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precis. Agric.* 5:131-144.
- Mamo, M., G.L. Malzer, D.J. Mulla, D.R. Huggins y J. Strock.** 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95:958-964.
- Melchiori, R.J.M., S.M. Albarenque y A.C. Kemmerer.** 2018. Evolución y cambios en la adopción de la agricultura de precisión en Argentina. En: 17° Curso Internacional de Agricultura y Ganadería de Precisión. INTA Manfredi, Córdoba.
- Mulla, D.J. y J.S. Schepers.** 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. p. 1-18. En F.J. Pierce, and E.J. Sadler (ed.) *The state of sitespecific management for agriculture*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Pagani, A. y A.P. Mallarino.** 2015. On-farm evaluation of corn and soybean grain yield and soil pH responses to liming. *Agron. J.* 107(1): 71-82.
- Peralta, N., J.L. Costa, M.C. Franco y M. Balzarini.** 2013. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia*. 38:418.
- Puntel, L.A., A. Pagani y S.V. Archonhoulis.** 2019. Development of a nitrogen recommendation tool for corn considering static and dynamic variables. *Eur. J. Agron.* 105:189-199.
- Raun, W.R., J.B. Solie y M.L. Stone.** 2010. Independence of yield potential and crop nitrogen response. *Precis. Agric.* 12:508-518.
- Sainz Rozas, H., H. Echeverría y H. Angelini.** 2010. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de las regiones Pampeana y extrapampeana de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 2:1-7. IPNI.
- Sawyer, J., E. Nafziger, G. Randall, L. Bundy, G. Rehm y B. Joern.** 2006. Concepts and rationale for regional nitrogen rate guidelines for corn. *Publ. PM2015*, Iowa State Univ. Extension, Ames, IA.
- Scharf, P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.C. Hubbard y J.A. Lory.** 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron. J.* 97(2): 452-461.
- Tellería, M.G., F. H. Gutiérrez-Boem y G.N. Ferraris.** 2016. Respuesta del cultivo de maíz a la aplicación anticipada de fósforo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 22:20-24.
- Wibawa, W.D., D.L. Dildu, L.J., Swenson, D.G. Hopkins y W.C. Dahnke.** 1993. Variable fertilizer application based on yield goal, soil fertility and soil map unit. *J. Prod. Agric.* 6: 225-261.
- Williams, B.G. y G.C. Baker.** 1982. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Aust. J. Soil Res.* 20:107-118.
- Wortmann, C., C. Shapiro, T. Shaver y M. Mainz.** 2018. High soil test phosphorus effect on corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 102:964- 971. ◀

## Satélites y Agricultura

### Satélite Argentino de Observación con Microondas "SAOCOM"

Francisco Damiano  
fdamiano52@hotmail.com

#### Misión Satelital Nacional

El SAOCOM 1A es el quinto satélite de observación construido en la Argentina bajo el liderazgo de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), y el primer satélite de radar dedicado a la producción agrícola y manejo de inundaciones en la Región Pampeana (Figura 1).

Desde el 7 de octubre de 2018 el SAOCOM 1A forma parte de la órbita del Sistema Ítalo Argentino de Satélites para la Gestión de Emergencias (SIASGE), una constelación de seis satélites que, por primera vez, ofrecerá productos y servicios de teledetección con Radar de Apertura Sintética (SAR) polarimétrico en bandas L (SAOCOM 1A y 1B) y X (4 satélites italianos COSMO-SkyMed), convirtiéndolo en un sistema único en el mundo (Figura 2).

Estos satélites poseen instrumentos que operan en el rango de las microondas del espectro electromagnético (REM), obteniendo información

en cualquier condición meteorológica y hora del día, debido a que no necesitan de la iluminación solar para operar y tampoco son afectados por la presencia de nubes, niebla o lluvia, a diferencia de las cámaras ópticas.

En particular, el SAOCOM 1A mapea la humedad del suelo ( $\theta$ ) con revisita de 16 días, basado en el principio de Reflectometría en el Dominio Frecuencia (FDR) 1.275 Gigahercio (GHz) y la permitividad dieléctrica del suelo ( $\epsilon_s$ ). La escala de resolución es de 1 km<sup>2</sup> (100 ha). Este dato toma mayor relevancia comparado con el radiómetro de las misiones Soil Moisture Active and Passive (SMAP, NASA) y Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS, ESA) con resoluciones espaciales de 26 y 52 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Los mapas de humedad de suelo y el cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), serán elaborados sobre un área de interés de 83 millones de hectáreas, comprendiendo las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba y La Pampa. La información brindada por el SAOCOM juntamente con el

uso de sistemas: i) Soporte a las Decisiones en Agricultura, y ii) Pronóstico de Fusariosis en trigo, ayudará a los productores a elegir cuál es el mejor momento para la siembra, fertilización, pulverización y riego en los principales cultivos.

Asimismo, aportará información estratégica al Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (Plan Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastre Argentina 2018-2023, <http://www.senado.gov.ar/upload/26448.pdf>). Las cuencas hidrológicas de la región pampeana serán receptoras de la red de observación de humedad edáfica del perfil del suelo en tiempo real, y

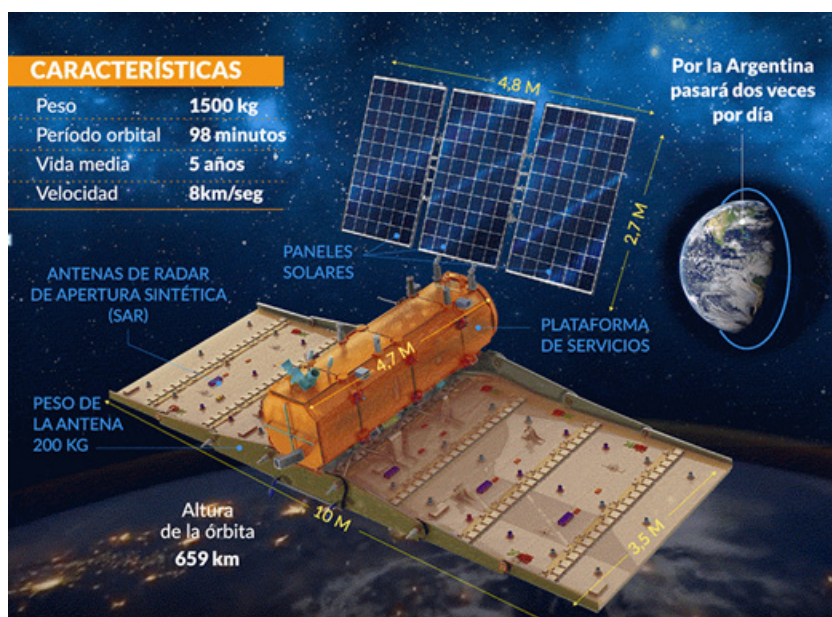


Figura 1. Características y componentes físicos del satélite SAOCOM. Fuente CONAE.



futuros usuarios del Modelo Digital de Elevación (MDE) y del mapa de anegamiento/inundación. Esta información es de vital importancia en la modelación hidrológica para uso en: i) Planificación del territorio y sistemas de producción, ii) Diseño de estructura de control, iii) Alerta hídrica rural/urbana, y iv) monitoreo de los recursos naturales, cambio en el uso de la tierra y variabilidad y/o

cambio climático.

La misión SAOCOM es comandada desde el Centro Espacial Teófilo Tabanera (CETT) en Córdoba. Actualmente se encuentra en período de puesta en servicio (Fase de "Commissioning"), para ofrecer, en pocos meses, imágenes y productos en los múltiples modos de captación y polarización. La constelación SIASGE se completará con la puesta en órbita del SAOCOM 1B, con probable fecha de lanzamiento en el 2019.

A modo de ejemplo, se presenta una mirada sobre San Nicolás de los Arroyos (provincia de Buenos Aires), captada por el satélite el 8 de marzo de 2019 (Figura 3). En las zonas centro y sur de la imagen se observan numerosas parcelas en distintas tonalidades, que se distinguen claramente debido a la forma geométrica típica de los trazados agrícolas y círculos de riego. Las distintas tonalidades se corresponden con distintos tipos y estadios de cultivos. Las parcelas que se ven muy oscuras indican terrenos sin presencia de cultivos, en los que es presumible que la cosecha ya se haya levantado o que no se haya sembrado cultivos en la temporada de verano. Los tonos más claros indican cultivos ya desarrollados, esperando el momento indicado para su cosecha.

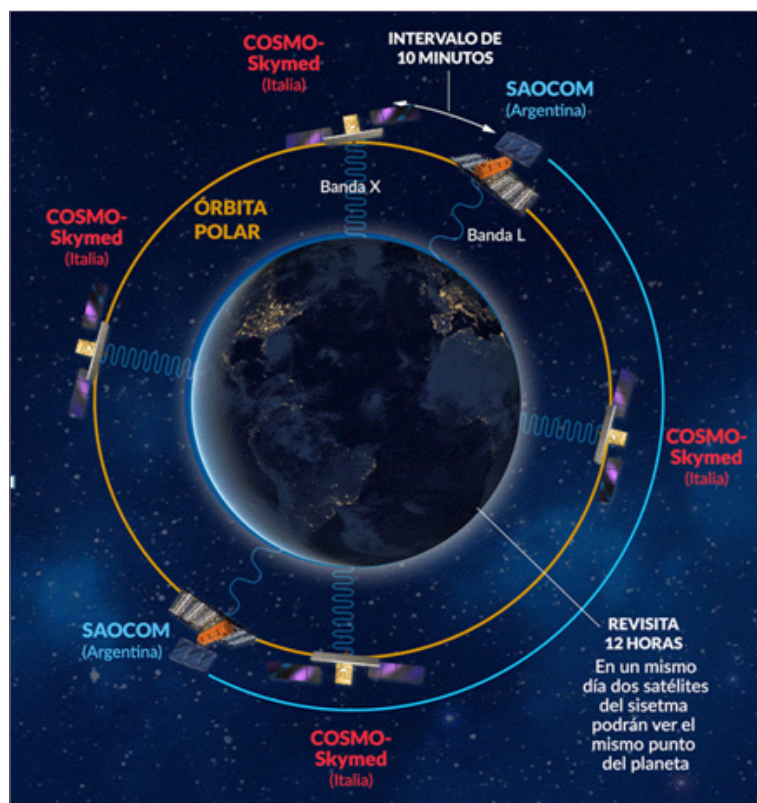


Figura 2. Constelación de satélites Ítalo Argentino de la Agencia Espacial Italiana y CONAE. Fuente CONAE.

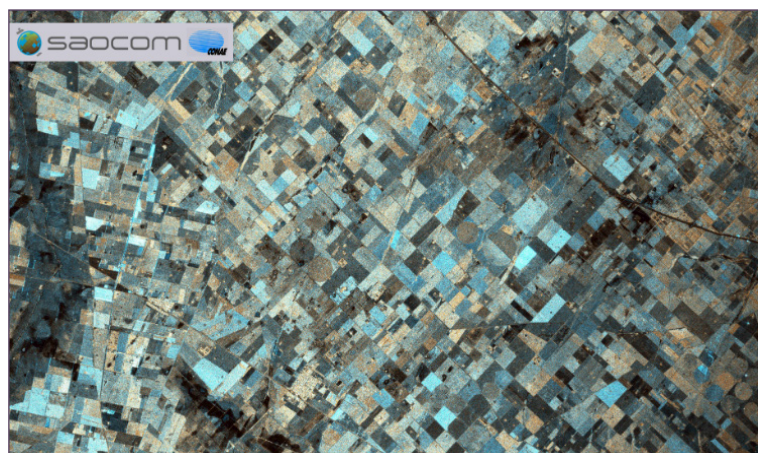


Figura 3. Imagen satelital SAOCOM con detalle de parcelas con distintos tipos y estadios de cultivos y uso del suelo. Fuente: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae>

## Teoría sobre la permitividad dieléctrica del suelo

La permitividad ( $\epsilon$ ) es una medida del grado en que la carga eléctrica distribuida en un material puede ser polarizada por la aplicación de un campo eléctrico externo variable. La permitividad del agua libre ( $\epsilon_w$ ) es aproximadamente igual a 80, la de las partículas minerales constituyentes del suelo ( $\epsilon_s$ ) oscila entre 3 y 5, y la del aire ( $\epsilon_a$ ) es igual a 1. Por tanto, dado el elevado contraste entre  $\epsilon_w$  y los demás componentes del suelo, el contenido en agua es el factor dominante del valor de esta propiedad en los suelos. De ahí que la  $\epsilon_w$  puede aplicarse como medida indirecta

del contenido de humedad del suelo, utilizando ondas electromagnéticas. Existe una ventana de medición entre 10 MHz y 2 GHz libre de pérdidas dieléctricas, en la cual la parte real de la permitividad ( $\epsilon'$ ) es prácticamente constante, mientras que la parte imaginaria ( $\epsilon''$ ) tiende a cero (**Figura 4**).

Los suelos tienen una estructura compleja con múltiples tiempos de relajación y permitividades, los cuales siguen una distribución estadística. Esta distribución estadística está relacionada con:

- La fracción volumétrica de los componentes: sólido, agua y aire.
- Características de cada componente e interacción entre los mismos.
- Microestructura de la matriz de suelo: capas, orientación, arreglos de partículas y poros.

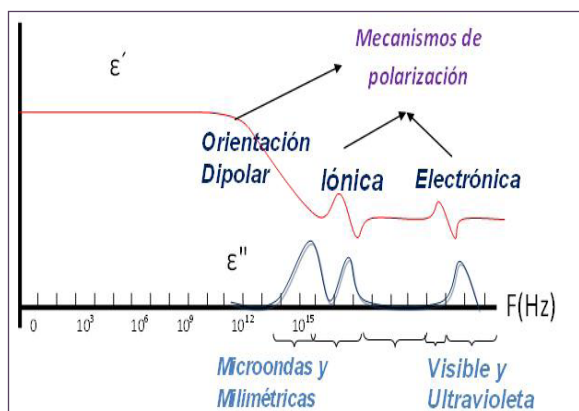
Existen modelos empíricos (Topp et al., 1980) y semiempíricos (Perplinsky et al., 1995) que describen la permitividad del suelo ( $\epsilon_s$ ):

$$\epsilon_s = f(T, \Theta, S, MO, \rho_p, \epsilon_w)$$

Donde:

T: Temperatura, °C;  $\Theta$ : Humedad del suelo, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>; S: Salinidad, dS m<sup>-1</sup>; MO: Materia orgánica, g kg<sup>-1</sup>;  $\rho_p$ : Densidad de partícula, Mg m<sup>-3</sup>;  $\epsilon_w$ : Permitividad del agua.

Si bien los modelos de permitividad de Topp y Perplinsky, entre los más difundidos, fueron establecidos para algunos tipos de suelos taxonómicamente similares a los de la Región Pampeana Argentina, su aplicación directa a nuestros suelos genera cierta incertidumbre, ya que, es ampliamente aceptado por la comunidad científica que



**Figura 4.** Mecanismo de polarización de la permitividad real ( $\epsilon'$ ) e imaginaria ( $\epsilon''$ ) del agua libre ( $\epsilon_w$ ) en función de la frecuencia del espectro electromagnético.

los modelos son sitio específico. Por ello, el segmento Terrestre EMIS (Equipo de Medición *In Situ*) de la Misión SAOCOM y el INTA desarrollaron protocolos de campo y laboratorio de medición de la curva de desecación  $\Theta$ - $\epsilon$ , con el fin de ajustar y validar algoritmos experimentales para los principales suelos pampeanos y los coeficientes de regresión de pedotransferencia usando las variables del suelo.

## Red de estación telemétrica y tipos de suelos

De las 67 estaciones telemétricas instaladas por CONAE en cinco provincias de Argentina, equipadas con sonda *FDR Hydra Probe* (4 varillas de metal de 5 cm) (**Figura 5**), se seleccionaron 15 series de suelo modales representativas de las unidades taxonómicas: Ustipsamientos ( $n = 1$ ), Haplustoles ( $n = 1$ ), Hapludoles ( $n = 6$ ) y Argiudoles ( $n = 7$ ), con un rango textural areno franco a franco arcillo limoso y diferentes usos.

La **Tabla 1** muestra un resumen de los resultados analíticos de los suelos bajo estudio. La densidad aparente ( $\rho_a$ ) varió de 1.14 a 1.38 Mg m<sup>-3</sup> ( $1.27 \pm 0.08$ ). La base de datos seleccionada responde a la variabilidad en textura, MO y cationes de los principales suelos pampeanos.

## Modelación de la permitividad dieléctrica del suelo

La sonda *Hydra Probe* fue probada con diferentes materiales, respondiendo al rango de permitividad que caracteriza los componentes naturales del suelo (Bellingham, 2007). Se obtuvieron en laboratorio 22 a 29 pares de valores por suelo con un rango de  $\Theta$  0.064 a 0.646 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> y  $\epsilon$  4.47 a 51.92 ( $n = 360$ ). En cada suelo se ajustó la función matemática que mejor representa el conjunto de pares de valores independientes  $\Theta = f(\epsilon)$ , usando el programa Curve Expert v.1.3. La ecuación resultante que mejor representa al conjunto de suelos ( $n = 15$ ), fue un polinomio de 3° con un  $r$  de 0.982 a 0.999 y un error estándar de 0.002 a 0.029 (**Tabla 2**). En línea general, el rango de  $\Theta$  y  $\epsilon$  respondió por clase textural, i.e., suelos de textura arenosa poseen menor contenido de poros de mayor tamaño y en sentido diametralmente opuesto se hallan los suelos de textura fina. El Ustipsament típico (Ut: areno franco) registró una amplitud de 0.064 - 0.393 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> y 5.16 - 27.26, el Argiudol petrocálcico (Apk: franco) 0.191 - 0.509 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> y 8.34 - 36.76 y

**Tabla 1.** Valores y estadísticos de variables físicas y químicas del suelo medidas en el horizonte superficial de 15 suelos de la región pampeana.

	pH	MO	CE	CIC	C	L	A
Md	6.4	34	0.9	15.7	207	399	394
Mn	5.7	9	0.2	8.5	20	140	330
Mx	8.4	67	3.5	29.1	294	700	840
DS	0.6	13	1.0	4.9	79	170	236

Md: medio; Mn: mínimo; Mx: máximo; DS: desvío estándar; MO: materia orgánica, g kg<sup>-1</sup>; CE: conductividad eléctrica, dS m<sup>-1</sup>; CIC: capacidad intercambio catiónico, cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; C: arcilla < 2 μm, g kg<sup>-1</sup>; L: limo 2-50 μm, g kg<sup>-1</sup>; A: arena 50-2000 μm, g kg<sup>-1</sup>.

**Tabla 2.** Coeficientes experimentales del modelo polinomio de tercer grado ajustado por tipo de suelo:  $\Theta$  (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) = - a + b \* ε - c \* ε<sup>2</sup> + d \* ε<sup>3</sup>.

Suelo	Coeficiente			
	a	b	c	d
Ut	0.063144	0.028117	0.000676	0.0000088
Hte	0.072725	0.0289501	0.000668	0.0000077
He1	0.067000	0.0443681	0.001745	0.0000313
Ha	0.058708	0.0366533	0.001295	0.0000215
Apk	0.104119	0.041992	0.001366	0.0000183
Ab1	0.070409	0.0392357	0.001429	0.0000227
Ab2	0.083521	0.0443365	0.001597	0.0000234
Ab3	0.082690	0.0439800	0.001690	0.0000287
He2	0.061611	0.0375214	0.001151	0.0000176
Htn	0.055767	0.0289649	0.000845	0.0000132
Hta1	0.065255	0.0427813	0.001440	0.0000227
Hta2	0.061641	0.0418284	0.001267	0.0000185
At1	0.055590	0.0348011	0.000973	0.0000128
Aa	0.043364	0.0307189	0.000963	0.0000130
At2	0.028832	0.0236216	0.000500	0.0000046

Ut: Ustipsament típico, Hte: Haplustol éntico, He1: Hapludol éntico, Ha: Hapludo ácuico, Apk: Argiudol petrocálico, Ab1: Argiudol abruptico, Ab2: Argiudol abruptico, Ab3: Argiudol abruptico, He2: Hapludol éntico, Htn: Hapludol thapto nátrico, Hta1: Hapludol thapto árgico, Hta2: Hapludol thapto árgico, At1: Argiudol típico, Aa: Argiudol ácuico, At2: Argiudol típico.

**Figura 5.** Ubicación geográfica de la red de monitoreo de la permitividad del suelo y características de la sonda Hydra Probe.



el Argiudol abruptico (Ab 2: franco arcillo limoso)  $0.191 - 0.571 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $9.15 - 36.34$ . Robinson et al. (2008) reportaron que la textura tiene un pronunciado efecto sobre la permitividad, especialmente por debajo de 5 GHz de frecuencia.

Los coeficientes experimentales (Tabla 2) fueron correlacionados con variables del suelo medidas y transformadas (Tabla 1), seleccionándose por step-wise ( $p < 0.05$ ) las variables regresoras de pedotransferencia (FPT) [Tabla 3]. Las ecuaciones de regresión explicaron el 75% y 86% ( $R^2$ ) de los valores experimentales con un  $DS < 0.011$  y  $p < 0.015$ . Las variables del suelo requeridas por las FPT están disponibles en los mapas de suelos INTA escala Semidetalle y Reconocimiento. Por otra parte, son simples de determinar por análisis en laboratorios de suelos.

Las FPT sobreestiman el valor de  $\Theta$  observado ( $n = 360$ ) con un Error Medio de  $0.002 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y un RMSE de  $0.039 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Figura 6). Estos errores son comúnmente aceptados en estudios de modelación hídrica.

### Aplicación de los modelos de permitividad del suelo

- La red telemétrica equipada con sonda Hydra Probe resultó apta para el estudio de la permitividad dieléctrica de los suelos pampeanos. Posee la propiedad de medir la humedad disponible para las plantas en el rango de onda electromagnético banda L (0.3 a 1.4 GHz), al igual que lo hace el satélite SAOCOM.
- Los algoritmos experimentales del modelo polinomio sitio específico, resultan promisorios para la misión SAOCOM, cuya finalidad es desarrollar un modelo inverso de estimación de la humedad superficial del suelo usando técnicas de reflectometría y teledetección radar.
- Los modelos de pedotransferencia podrán ser usados en el seguimiento puntual de la dinámica

de la humedad edáfica en tiempo real, disponiendo de los datos de permitividad de la red telemétrica CONAE y accediendo a la cartografía de suelos en el portal GeoINTA.

### Bibliografía

- Bellingham K. 2007. The Stevevans Hydra Probe Inorganic Soil Calibrations. Stevens Water Monitoring Systems Inc. Portland, Oregon. Pp 5.
- Perplinsky N.R., F.T. Ulaby, & M.C. Dobson. 1995. "Dielectric Properties of Soils in the 0.3-1.3-GHz Range". IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing; Vol. 33; N° 3; May.
- Robinson D.A., C.S. Campbell, J.W. Hopmans, B.K. Hornbuckle, S.K. Jones, R. Knight, F. Ogden, J. Selker, & O. Wendroth. 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A Review. Vadose Zone J. 7: 358-389.
- Topp G.C., J.L. Davis, & A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resour. Res.; 16: 574-582. ◀

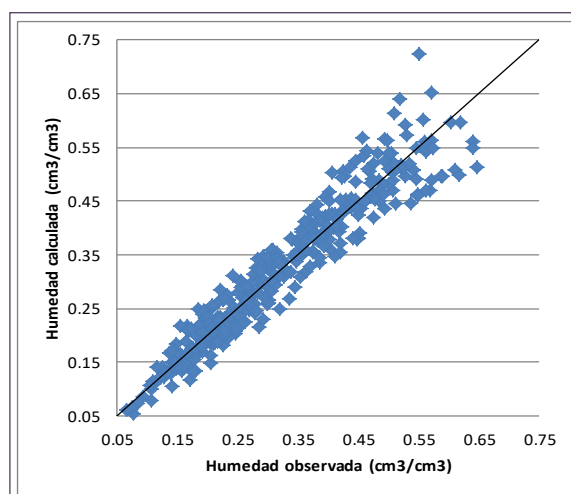


Figura 6. Comparación entre valores de humedad observada experimentalmente y la humedad calculada con la ecuación polinomio y los coeficientes del modelo de regresión múltiple de pedotransferencia.

Tabla 3. Regresiones múltiples de pedotransferencia ( $y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n$ ) ajustadas a los coeficientes experimentales por variables medidas en el suelo (Tabla 1: ver unidades).

Coeficiente	Variables regresoras					
		C	MO	C*L	C <sup>2</sup>	MO <sup>2</sup>
a	$-4.053 \cdot 10^{-2}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$-5.368 \cdot 10^{-2}$	$5.239 \cdot 10^{-5}$	$3.472 \cdot 10^{-4}$	$6.91 \cdot 10^{-3}$
		C		A	CIC	
b	$-6.07 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$		$4.413 \cdot 10^{-4}$	$-8.633 \cdot 10^{-4}$	
c	$9.785 \cdot 10^{-4}$	$-1.068 \cdot 10^{-4}$		$-2.276 \cdot 10^{-5}$	$6.114 \cdot 10^{-5}$	
d	$-2.388 \cdot 10^{-5}$	$2.084 \cdot 10^{-6}$		$4.639 \cdot 10^{-7}$	$-1.272 \cdot 10^{-6}$	



# El futuro de las tecnologías para el agro

Rodolfo Bongiovanni<sup>1</sup> y James Lowenberg-DeBoer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INTA EEA Manfredi; <sup>2</sup> Harper Adams University, Reino Unido

<sup>1</sup> Bongiovanni.rodolfo@inta.gob.ar; <sup>2</sup> JLowenberg-DeBoer@harper-adams.ac.uk

## Resumen

*Este trabajo estudia la adopción de tecnologías de agricultura de precisión (AP), desde el punto de vista económico, determina si los resultados económicos pueden tomarse como indicadores de la adopción, e identifica algunas tecnologías potencialmente rentables. Los datos muestran que la tecnología más adoptada a nivel mundial es el sistema de navegación por GPS (banderillero satelital, piloto automático, etc.), mientras que la tecnología de dosis variable (DV) creció más lentamente. Esta es una tendencia que fue correctamente pronosticada en la década del 1990 (Lowenberg-DeBoer, 1998). Los estudios más recientes de la última década muestran que las tecnologías de AP más rentables son la dosis variable de N en base a sensores, la robótica agrícola, la inteligencia artificial (IA) y el uso de Big Data (Lowenberg-DeBoer J. , 2019). Este trabajo también analiza el futuro de las tecnologías blandas para el futuro, incluyendo los paradigmas de la Agricultura Clímicamente Inteligente, las Huellas Ambientales y la Economía Circular.*

## Introducción

En el 2017, el Foro Económico Mundial (WEF, 2017) publicó la lista de las 10 tecnologías emergentes más importantes a lo largo y a lo ancho de todos los sectores económicos del mundo, dentro de las cuales aparece en sexto lugar la Agricultura de Precisión (AP). El WEF define la AP como un conjunto de herramientas de la Cuarta Revolución Industrial, aplicadas al Sector Agropecuario para aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos, y al mismo tiempo reducir las Huellas Ambientales por el uso de agua y productos químicos. Esta tecnología, también llamada Agro 4.0, utiliza sensores, robots, GPS, herramientas de mapeo y software de análisis de datos para optimizar la producción y la sostenibilidad ambiental, social y económica. Más recientemente, el WEF ubica a los robots y a la inteligencia artificial en primer lugar dentro la lista de las 10 tecnologías

más importantes del 2018 y 2019 (WEF, 2019). Por lo tanto, se analizará el futuro de las tecnologías para el agro dentro de esta priorización del Foro Económico Mundial y desde el punto de vista de la gestión de la tecnología, es decir, desde la perspectiva económica.

Si bien la AP tiene un gran potencial para reducir las huellas ambientales de la agricultura y colabora cada vez más con las implicaciones sociales de la tecnología, la adopción generalizada de las tecnologías de la AP dependerá de su rentabilidad. La agricultura es un negocio y como tal, la tecnología se adopta si genera beneficios. A veces, esos beneficios son cualitativos (por ej., uso más eficiente del tiempo, reducción de la fatiga, menos estrés, etc.), pero por lo general se buscan beneficios monetarios (márgenes más altos y más estables). El sector agropecuario está sujeto a la "física económica" en el sentido de que siempre debe haber alguien que pague las cuentas, al igual que todos estamos sujetos a la ley de gravedad, ya sea que lo consideremos justo o no. Todos los factores de la producción deben retribuirse, incluyendo la gestión, el trabajo, el capital, el costo de oportunidad de la tierra y otros recursos naturales. En consecuencia, el objetivo general de este trabajo es resumir el estado del arte en economía de la agricultura de precisión. Por otro lado, asumiendo que la adopción es el mejor indicador de la rentabilidad y de los beneficios de la tecnología, los objetivos específicos de este trabajo son:

- 1) revisar la adopción de la AP,
- 2) determinar si la investigación predijo correctamente las tecnologías de AP adoptadas por los productores, y
- 3) identificar algunas tecnologías de AP potencialmente rentables.

Las primeras revisiones sobre la rentabilidad de la AP son los trabajos de Lowenberg-DeBoer y colaboradores (Lambert & Lowenberg-DeBoer, 2000) (Griffin, Lambert, & Lowenberg-DeBoer, 2005). Después de 2004, la cantidad de estudios aumentó exponencialmente y las revisiones de

la economía de la AP se hicieron más difíciles. Hubo algunos estudios generales, como el de Tenkorang y Lowenberg-DeBoer (2008), que revisaron cientos de artículos e informes sobre teledetección. Sólo unos pocos que informaron beneficios económicos y un número aún menor explicaba cómo se estimaba ese beneficio económico. Doce estudios indicaron una rentabilidad promedio de USD 31,74 ha<sup>-1</sup>.

De a poco los países de la Unión Europea y de la OCDE fueron estudiando la importancia económica de la AP, y generaron algunas políticas de incentivos para los sistemas de navegación por GPS y al tránsito controlado, aunque ratificaron que la rentabilidad de la DV es muy variable, porque depende del cultivo, las condiciones del suelo y muchos otros factores (Zarco-Tejada, Hubbard, & Loudjani, 2014) (OCDE, 2016).

En Australia, Cook et al. (2000) señalaron que la adopción lenta de AP se debía principalmente a la falta de rentabilidad. Zhang et al. (2002) confirmaron que a pesar de una inversión sustancial en investigación en AP en los EE.UU., Canadá, Australia y la Unión Europea, solo una pequeña parte de los productores utilizan la tecnología. Kitchen (2008) ratificó que la adopción de la agricultura de precisión se vio obstaculizada porque la agronomía y la ingeniería no se han unido para generar soluciones comerciales de manera que compensen la inversión de tiempo y dinero.

## 1. Panorama de la adopción de tecnologías de AP en el mundo

### 1.1. Sistemas de posicionamiento

1.1.1. Los **sistemas de navegación por GPS** se están adoptando rápidamente casi en todos los países de agricultura mecanizada. Contrariamente, las tecnologías de dosis variable (DV) se adaptan sólo en condiciones donde la variabilidad de suelos y la rentabilidad potencial se combinan para motivar la adopción. El ejemplo clásico de un cultivo de alto valor es la producción de remolacha azucarera en el Valle del Río Rojo del Norte en los estados de Minnesota y Dakota del Norte en los Estados Unidos. Por otro lado, un ejemplo en el que la variabilidad dentro del lote justifica la DV, es en el Valle de Victoria en Australia, donde la adopción es del 37% (Lewellyn & Ousman, 2014).

1.1.2. Al igual que la guía de GPS, la adopción de **tecnologías de AP basadas en la navegación por GPS** es bastante alta. Por ejemplo,

la encuesta de CropLife / Purdue de 2017 encontró una adopción del 73% en los contratistas de pulverizadoras (CropLife / Purdue University, 2019). En Argentina, en 2017, había 19158 pulverizadoras con banderillero satelital y 9035 pulverizadores con guía automática (Scaramuzza, Villarroel, & Velez, 2018).

### 1.2. Tecnologías de recolección de datos

1.2.1. Los **monitores de rendimiento en cosechadoras** son parte de la tecnología AP original introducida a principios de los años noventa. En los países más desarrollados, los monitores de rendimiento se han convertido en un equipo estándar en cosechadoras nuevas, pero muchos de esos monitores de rendimiento no se usan en absoluto o se usan sin GPS, por lo que no se pueden mapear los datos. Por ejemplo, los datos de la encuesta del USDA (Schimmelpfennig, 2016) muestran que, en 2010, el **61%** de los productores de **maíz** utilizó una cosechadora equipada con un **monitor**, pero solo el **34%** hizo **mapas** de rendimiento. En 2006, el **45%** de los productores de **soja** de EE.UU. utilizaron una cosechadora equipada con un **monitor** de rendimiento, pero el **20%** hizo **mapas** de rendimiento. Para el **arroz** en 2006, el **29%** de los encuestados utilizó un monitor de rendimiento, pero solo el **10%** hizo **mapas**. Para **trigo** en 2009, el **36%** de los encuestados utilizó un **monitor** de rendimiento, pero solo el **6%** hizo **mapas**. Los productores se quejan de que no saben cómo usar los datos del mapa de rendimiento y, en consecuencia, no tienen la motivación para recopilar datos de rendimiento de buena calidad para los mapas.

1.2.2. **Sensores remotos.** Desde la década de 1970 se vienen realizando esfuerzos para utilizar datos de teledetección satelital y algunos proveedores de servicios han adoptado la tecnología, pero el uso práctico de los datos por parte de los productores todavía no está muy difundido. La encuesta de CropLife / Purdue de 2017 muestra que el 59% de los proveedores de servicios ofrecen imágenes satelitales o aéreas a los productores. Los datos más recientes de la encuesta del USDA muestran que en 2005 solo el **6%** de los productores de **maíz** usaron una imagen aérea o satelital, en 2002 solo el **1%** de los productores de **soja**, en 2003 el **7%** de los productores de **algodón** y en 2004 el **3%** de los productores de **trigo**. En Europa, Lawson et al. (2011) indican que las imágenes remotas fueron utilizadas en 2010

por el 10% de los encuestados **alemanes**, el 1% de los encuestados **daneses** y **ninguno** de los encuestados **finlandeses**.

1.2.3. El interés por los **drones** y los vehículos aéreos no tripulados (UAV) aumentó considerablemente. Las conferencias y las revistas científicas de la AP están llenas de presentaciones y artículos sobre aviones no tripulados. Algunos proveedores han comenzado a ofrecer servicios de imágenes de aviones no tripulados. La encuesta de CropLife / Purdue de 2017 muestra que el 32% de las empresas proveedoras de servicios ofrece servicios de imágenes a través de drones.

1.2.4. En los EE. UU. y Canadá, la mayoría de los proveedores de insumos agrícolas ofrecen algún tipo de **muestreo intensivo de suelos**, generalmente basado en grillas o zonas de manejo. La encuesta de CropLife / Purdue de 2017 mostró que el 82% de los proveedores ofrecen este servicio. Los datos de USDA sugieren que el uso por parte de los productores es sustancialmente menor que la oferta de servicios: en maíz, en 2010, 22%; productores de soja, en 2012, 19%; productores de arroz, en 2013, 12%; productores de algodón, en 2007, 5%; de maní, en 2013, 24%; y productores de trigo, en 2009, 6%. En el Reino Unido, una encuesta DEFRA de 2012 mostró que el 14% de los agricultores utilizan algún tipo de mapa de suelos de precisión (DEFRA, 2013). Lawson et al. (2011) indican que el 14% de los productores alemanes usó muestreo de cuadrícula y el 5% de muestreo de zona, los encuestados daneses reportaron que el 5% usó muestreo por cuadrículas y el 1% muestreo por zonas. En Brasil, Molin (2017) informa que el 79% de los productores brasileños hicieron mapas de suelo de AP, pero la escala de la muestra (más de 5 hectáreas) plantea dudas sobre la precisión de esos mapas de suelo.

1.2.5. La medición de la **conductividad eléctrica del suelo** (CE) para el manejo de nitrógeno (N) es una técnica que precede a la era de la agricultura de precisión, pero las ofertas de servicios de CE son limitadas y los productores en general no han adquirido esos servicios. La encuesta de CropLife / Purdue de 2017 encontró que el 34% de los proveedores de servicios de EE.UU. ofrecían mapas de suelo de CE. Las encuestas de USDA de 2002 para la soja, 2003 para el algodón y 2010 para el maíz mostraron que alrededor del 1% de los encuestados uti-

lizan mapas de suelo basados en la CE. Tanto los productores como los agrónomos se quejan de la dificultad de interpretación de la CE del suelo (USDA, 2018).

## 2. Relación entre la rentabilidad de una tecnología y su nivel de adopción

2.1. En general, la tendencia de adopción de tecnologías AP se pronosticó con bastante exactitud por estudios económicos realizados en los años '90 y en los primeros años del siglo XXI. Los estudios más útiles fueron los que iban más allá del Margen Bruto y que incluyeron costos de gestión, de capacitación y los problemas relacionados con el personal. Desde que se introdujeron los **sistemas de navegación por GPS** para equipos agrícolas en tierra a fines de la década de 1990, casi todos los estudios económicos han mostrado beneficios económicos positivos que podrían cuantificarse y beneficios cualitativos que fueron más difíciles de medir. En consecuencia, la rápida adopción de esta y otras tecnologías relacionadas al GPS no fue una sorpresa.

2.2. El primer estudio publicado sobre la rentabilidad del **banderillero satelital** se realizó en la Universidad de Purdue con datos proporcionados por las compañías que presentaron los primeros productos de mercado (Lowenberg-DeBoer J., 1999). El estudio se centra en los beneficios de los sistemas de barra de luces GPS porque el piloto automático aún no estaba disponible comercialmente. Resume los beneficios cualitativos de la guía de la barra de luces del GPS y cuantifica los beneficios de reducción de los saltos y de la superposición, menos los costos operativos, en comparación con los marcadores de espuma y disco utilizados hasta ese momento. Los resultados indicaron un beneficio modesto. La situación fue similar para los muchos productores que ya habían invertido en GPS para monitorear el rendimiento. El estudio predijo el crecimiento de la tecnología de piloto automático GPS en la agricultura basada en tecnologías que ya se estaban utilizando en la construcción y la minería en ese momento.

2.3. Por otro lado, los resultados de los estudios de rentabilidad de la **DV de fertilizante** son inciertos y contrastan con los resultados positivos encontrados en los estudios de sistemas de navegación por GPS. Swinton y Lowenberg-DeBoer (1998) realizaron una de las primeras revisiones

de la rentabilidad de la DV de fertilizantes. Encontraron que no era rentable para cultivos de bajo margen, como el trigo y la cebada, a veces rentable para el maíz y bastante rentable para cultivos de mayor valor, como la remolacha azucarera. Concluyeron que el costo de la información del suelo era un factor clave en los resultados y que reducir el costo y aumentar la resolución de los datos con sensores ópticos y de suelo era un requisito clave para la adopción generalizada de la tecnología de DV de fertilizantes. Posteriormente, las revisiones Lambert y Lowenberg-DeBoer (2000), y Griffin et al, (2005) reforzaron esas conclusiones, revisando 108 estudios que informaron que el 69% de los estudios reportaron beneficios positivos de DV de fertilizantes. 80% de los estudios de remolacha azucarera reportaron un beneficio, el 72% de los estudios de maíz y solo el 20% de los estudios de trigo. Por su parte, los resultados de Argentina indican niveles de rentabilidad levemente positivos para trigo y medianos a altos para maíz, dependiendo de la complejidad del análisis (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2006) (Bongiovanni, Mantovani, Best, & Roel, 2006) (Bongiovanni, Robledo, & Lambert, 2007) (Espósito, 2013).

2.4. Por último, Griffin et al (2005) destacan la **ventaja económica de las tecnologías de "conocimiento incorporado"**, en comparación con las tecnologías de "información intensiva" como la DV. La mayor parte de la tecnología agrícola exitosa del siglo XX fue del tipo de conocimiento incorporado. Por ejemplo, las semillas híbridas, los fertilizantes y la mayoría de los pesticidas incluían un conocimiento científico importante, pero no requerían mucha experiencia para usarlos. Entre las tecnologías de AP, la navegación por GPS es una tecnología de conocimiento incorporado y la DV de fertilizante es una tecnología de conocimiento intensivo. Griffin et al (2005) argumentan que la DV tendría que convertirse en una tecnología de conocimiento incorporado para lograr una adopción generalizada, por ej., la aplicación de DV de fertilizante utilizando un sensor montado en la parte frontal de la máquina.

Para concluir sobre la relación entre rentabilidad y adopción, se puede decir que los estudios económicos identificaron con éxito las oportunidades clave para la tecnología, los patrones de adopción a largo plazo y las importantes

limitaciones para una adopción generalizada. Sin embargo, nadie ha sido particularmente exitoso en la predicción de tendencias de adopción de AP ex ante y a corto plazo.

### 3. Implicancias de los estudios más recientes sobre rentabilidad de las tecnologías AP

Es importante comprender las causas y predecir las tendencias de adopción de las tecnologías AP a largo plazo, tanto para los productores, como para la agroindustria y la investigación. Los **productores** deben hacer planes a largo plazo al planificar la producción y comprar equipamiento. Comprender las tendencias de la tecnología a largo plazo ayuda a tomar decisiones y evita realizar grandes inversiones en tecnología que está a punto de volverse obsoleta. Por el lado de los **proveedores de servicios**, alcanzan los mayores beneficios cuando están tecnológicamente listos para responder a la demanda de una tecnología o innovación por parte de los productores. Por su parte, los investigadores deben seguir líneas de investigación que generen financiación, para lo que los estudios económicos de la última década brindan algunas perspectivas sobre la futura adopción de tecnologías de la AP, incluyendo:

**3.1. DV de fertilizante basada en sensores:** a los productores les atrae la idea de la DV de fertilizantes. Tiene sentido gestionar diferentes áreas dentro de los campos de acuerdo con la capacidad productiva y las restricciones de esa área. Sin embargo, tanto el análisis económico como los intentos de comercializar servicios y equipos de DV de fertilizantes muestran que la tecnología actual no tiene una buena relación costo/beneficio para la mayoría de los productores. Los costos de información necesarios para desarrollar los mapas de prescripción de DV de fertilizantes son demasiado altos y la respuesta del cultivo puede estar limitada por otros factores que van más allá de la fertilidad química del suelo. Los sistemas basados en sensores en tiempo real permiten que la DV de fertilizante se asemeje más a las tecnologías de conocimiento incorporado, la que tiene un historial comprobado de éxito. Los sistemas basados en sensores en tiempo real podrían aumentar la precisión al aumentar la resolución de la información y reducir los costos, al convertir la prescripción de fertilizante en un algoritmo.



Lamentablemente, el análisis económico de los sistemas de sensores actualmente disponibles en el mercado, sugiere que todavía se necesita una mejora. Por ejemplo, Biermacher et al. (2009) condujeron experimentos en trigo en Oklahoma durante el período 1998-2006. Probaron un sensor óptico y un algoritmo de optimización de fertilizantes nitrogenados desarrollado en la Universidad de Oklahoma. El estudio encontró que la DV de nitrógeno basada en sensores tiene un potencial económico importante, pero que el sistema actual funciona tomando promedios, según los criterios convencionales de prescripción de nitrógeno. Asimismo, Scharf et al. (2011) informaron que en 55 ensayos a campo en Missouri, la DV de N con sensores produjo mayores rendimientos de maíz y un menor uso de nitrógeno que las prácticas convencionales; y que, en promedio, la DV-N por sensores resultó en un aumento de USD 42 ha<sup>-1</sup> en el Margen Bruto, pero no se tuvo en cuenta la amortización del equipamiento ni el costo extra por la complejidad del manejo de la maquinaria.

Uno de los puntos débiles de los sistemas de sensores para la DV-N es que no tienen en cuenta la capacidad productiva del suelo, por ejemplo, el color del cultivo puede indicar una falta de nitrógeno, pero en realidad el problema es la profundidad del suelo u otra restricción. Diacono et al. (2013) revisaron 17 estudios de AP para el manejo de nitrógeno en trigo y recomiendan combinar datos de sensores con mapas de suelo, imágenes de sensores remotos, mapas de rendimiento y otros datos para adaptar la aplicación de nitrógeno a las restricciones específicas del sitio. Asimismo, informan que la DV-N con sensores tiene una rentabilidad de USD 5 a USD 60 por hectárea con respecto la aplicación uniforme. Por lo tanto, algunas compañías de sensores de nitrógeno están comenzando a introducir sistemas que combinan datos de sensores con otra información de campo.

**3.2. Robótica agrícola:** la lógica económica indica que la robótica debe adoptarse rápidamente cuando la tecnología es adecuada para tareas agrícolas repetitivas como sembrar, controlar malezas, plagas, enfermedades y cosechar. En todas partes del mundo (incluso en los países en desarrollo), la mano de obra rural es cada vez más cara y difícil de encon-

trar. Muchos países desarrollados (por ejemplo, EE.UU., Europa) han dependido de la mano de obra inmigrante durante muchos años, pero los gobiernos enfrentan una creciente presión política para reducir tanto la inmigración legal como la indocumentada. Es poco probable que en los países desarrollados se puedan aumentar los salarios lo suficiente como para atraer trabajadores locales. Por lo tanto, los robots son la alternativa más probable.

Una diferencia clave entre la automatización que se dio en la mecanización agrícola con los sistemas de navegación por GPS y la robótica agrícola, es que es muy probable que la robótica agrícola utilice muchas máquinas relativamente pequeñas en lugar de unas pocas grandes (Blackmore, Fountas, Tang, & Have, 2004). Una vez que se logre el funcionamiento de maquinaria agrícola autónoma y se reduzca la dependencia de los seres humanos, casi desaparece la motivación económica para la maquinaria agrícola grande. Realizar labores con enjambres de pequeños robots seguramente cambiará las prácticas agronómicas y la geografía de la agricultura. Por ejemplo, con la aplicación de pesticidas robóticos podría ser posible pulverizar cada plaga individualmente en lugar de la aplicación amplia. Esto podría reducir en más del 90% la aplicación de agroquímicos y reducir los efectos negativos sobre las especies beneficiosas. Con robots relativamente pequeños, disminuye la ventaja económica comparativa de los grandes lotes de gran superficie. Los robots pequeños tienen menos probabilidades de desencadenar las preocupaciones de seguridad y responsabilidad que requieren a los humanos en equipos más grandes para "apretar el botón rojo en caso de un problema".

Exceptuando el ordeño robótico, hay pocos datos sobre robots en la producción agrícola. Los robots de ordeño están en el mercado desde hace más de 20 años. Numerosos informes y estudios han demostrado que son prácticos y rentables para algunos tambos, según el costo y disponibilidad de mano de obra (Salfer, Endres, Lazarus, Minegishi, & Berning, 2017). Para los robots en la producción de cultivos, la mayoría de los estudios económicos se han basado en presupuestos de ingeniería económica, desarrollados a partir de parámetros técnicos, no de la experiencia de campo. Por ejemplo, Pedersen et al. (2017) estimaron los

beneficios del control de malezas en remolacha azucarera, el seguimiento de cultivos en cereales y el corte de césped en campos de golf. Demostraron que las opciones robóticas eran potencialmente rentables, aunque las principales limitaciones fueron el costo del GPS RTK y la capacidad limitada de los robots pequeños.

**3.3. Inteligencia artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT) y "Big Data" en agricultura:** la IA y el Big Data son temas candentes en la investigación agrícola y en congresos de los últimos años. Hay muchos trabajos académicos sobre el tema. Wolfert et al. (2017) revisaron 114 trabajos. Asimismo, una búsqueda en Internet muestra muchos artículos sobre el tema. En EE.UU., los prestadores de servicios agropecuarios ven la gestión de datos como un área en crecimiento. En la encuesta de CropLife de 2017, el 58% de los prestadores de servicios agropecuarios archivaron los datos de suelo y otros datos para los productores, el 41% trabajó con los productores para analizar los datos de sus propios campos, el 17% agrupó los datos entre los clientes y el 10% participó en el análisis de los datos de los lotes. Solo el 31% de los encuestados dijo que el análisis de los datos del monitor de rendimiento fue rentable y solo el 20% indicó que la relación beneficio / costo era favorable. Si bien es lógicamente atractivo utilizar IA para sacar información de las masas de datos recopilados por sensores y otras fuentes en la agricultura, es más difícil evaluar la rentabilidad y otros beneficios económicos de este enfoque. Los problemas en esta evaluación económica incluyen:

- Definir exactamente qué constituye IA, IoT y Big Data: los algoritmos informáticos se han utilizado durante muchos años en la agricultura. Por ejemplo, desde la década de 1960, los productores vienen utilizando la programación lineal para planificar rotaciones de cultivos y dimensionar el parque de maquinaria. La mayor parte de la alimentación animal en el mundo desarrollado está formulada por algoritmos informáticos. En la mayoría de las definiciones, la característica común de Big Data es que los datos permitan tomar las mejores decisiones, las más acertadas y con el menor riesgo. Es la gestión y análisis de enormes volúmenes de datos que no pueden ser tratados de manera

convencional, ya que superan los límites y capacidades de las herramientas de software habitualmente utilizadas. También puede verse como una nueva generación de tecnologías y arquitecturas diseñadas para extraer el valor económico, al permitir a alta velocidad de captura, descubrimiento y/o análisis de la enorme cantidad de datos de sensores que se generan en el campo, como así también de los datos de monitoreo de rendimiento e imágenes satelitales almacenadas durante años.

- Al igual que con la teledetección, los drones, el monitoreo de rendimiento y otras tecnologías de recopilación de información en la agricultura, la rentabilidad de la IA y el análisis de Big Data dependen de las decisiones tomadas y las acciones que se tomen para generar un valor económico. Es decir, Big Data no es sólo para "sacar la foto", sino que debe estar asociado a estrategias enfocadas a la administración y creación de conocimiento sobre el medio, para optimizar el proceso de toma de decisiones en los agronegocios.
- La mayoría de los análisis económicos disponibles de IA y Big Data se basan en simulación e ingeniería económica, en lugar de en datos de campo. Por ejemplo, Li y Yost (2000) simularon el uso de inteligencia artificial para optimizar la gestión del nitrógeno y el riego, y mostraron una ganancia económica importante. Al igual que en el caso de la robótica agrícola, el hecho de que gran parte del análisis económico se basa en la simulación en lugar de en los datos de campo no es motivo suficiente para descartar la idea, pero es una razón para presionar para obtener más datos a campo.

**Internet de las Cosas (IoT)** se refiere a la interconexión digital de objetos cotidianos con internet. Describe el punto en el tiempo en el que se conectan a internet más "cosas u objetos" que personas, lo que implica que se deben codificar de 50 a 100 trillones de objetos y seguir su movimiento. Se calcula que en el 2020 habrá 30 mil millones de dispositivos con un sistema de adaptación IoT. Con el protocolo de internet IPv6 se podrían identificar todos los objetos, incluyendo su ubicación. El desafío de la IoT es desarrollar aplicaciones para controlar los dispositivos autónomos. Un enfoque para lograrlo es la "Interacción predecible", donde las decisiones se toman en la nube y piden una acción del usuario para generar una reacción.

La tecnología es fundamental en el camino tecnológico de la IoT, desde lo más determinístico como las etiquetas RFID, que aparecieron a fines del siglo XX como una demanda del sector logística, para reducir costos y aumentar la seguridad; hasta la tecnología más compleja, aplicada a sistemas caóticos, que permite el monitoreo y control de objetos, tanto en el mundo externo como en la web, a través de sensores y software (SRI, 2008).

En este sentido, la Universidad de Purdue, en Indiana, EE.UU., es pionera en IoT aplicada al sector agropecuario. El Departamento de Ingeniería Agrícola tiene un grupo de investigadores que trabaja en el manejo de grandes bases de datos y su disponibilidad online, IoT, y que se especializan en el desarrollo de programas de computación y aplicaciones para celulares, para ser usados en el agro. Los sistemas son abiertos y automáticos, y entre otros se encuentra el sistema *autogenics* (*automatically generated data for logistics*). El grupo se llama *Oats* y su dirección web es <https://engineering.purdue.edu/oatsgroup>. En este mismo Departamento se desarrolló un software (<http://www.sensorhound.com/>) para IoT que permite reducir el costo operativo y aumentar la seguridad de los sensores que se usan en el agro para subir datos a la nube.

En el sector privado, existen muchas empresas, tales como SST (<http://www.sstsoftware.com/>), fundada en 1994 por un grupo de profesores de la Universidad de Oklahoma, EE.UU., visionaria en la gestión de datos automáticos georreferenciados que son convertidos en información en tiempo real. En la actualidad gestiona un pool de datos de 50 millones de hectáreas en 23 países, los que son analizados con algoritmos complejos, para entregar información para la gestión en forma descentralizada. En Europa, se puede citar como ejemplo el caso de *F4F/SAP* (<https://www.f4f.com/>), que integra la cadena de suministro en la nube, centrada en el productor.

Por su parte, **Big Data** se refiere a los conjuntos de datos largos o complejos, que no se pueden analizar con métodos tradicionales. Incluye los procesos de capturar, limpiar, buscar, compartir, almacenar, transferir, visualizar, consultar, actualizar y asegurar la privacidad de la información. Es decir, Big Data se puede referir al uso de analítica predictiva, del comportamiento del usuario, o de otros métodos analíticos para agregar valor a los datos. Hay aspectos a tener en cuenta que aún no han sido solucionados, como la limpieza de

datos irrelevantes y las cuestiones relacionadas a la propiedad y la privacidad.

Desde el punto de vista económico, el primer efecto de esta cantidad creciente de datos es que significa un **costo más bajo** de los bienes y servicios que dependen de la predicción (Agrawal, Gans, & Goldfarb, 2016).

Como se puede deducir, es necesario que la AP disponga de la tecnología acorde para procesar en tiempo real una cantidad creciente de datos. Según una consultora, el agro actualmente genera aproximadamente unos 100.000 puntos de información por día en el mundo, mientras que se estima que hacia el 2035 se producirá un crecimiento exponencial, con 4 millones de datos diarios generados en el sector agropecuario (BI Intelligence, 2015).

El potencial económico de Big Data coincide con el de la AP, que es el de reducir los costos en la producción de granos, aumentar la productividad y hacer un uso más eficiente de los factores de producción. La mejora de la rentabilidad potencial puede provenir del aumento del valor de la producción (cantidad y/o calidad de granos), de la reducción en la cantidad de insumos (semillas, fertilizantes, agroquímicos, etc.) o de ambos simultáneamente.

### 3.4. Agricultura Climáticamente Inteligente: la evolución de la agricultura de precisión hacia las huellas ambientales, bajo la mirada de la sostenibilidad y de la Economía Circular

La **Agricultura Climáticamente Inteligente** constituye un enfoque que ayuda a orientar las acciones necesarias para transformar y reorientar los sistemas agrícolas a fin de apoyar de forma eficaz el desarrollo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante. La agricultura climáticamente inteligente persigue tres objetivos principales: A) el aumento sostenible de la productividad y los ingresos agrícolas, B) la adaptación y la creación de resiliencia ante el cambio climático y C) la reducción y/o absorción de gases de efecto invernadero (Bongiovanni R., 2017). La agricultura inteligente emplea el conocimiento como el principal insumo sobre el que se apoya la producción sostenible en sus tres aspectos: social, ambiental y económico. Sin embargo, el conocimiento es difícil de alcanzar, porque en el mejor de los casos, sólo se dispone de datos, que necesitan ser procesados y analizados con criterios científicos para hacer

más eficiente el uso de los recursos disponibles, bajo la mirada de la sostenibilidad. En este sentido, en los últimos años surgieron métodos para cuantificar las Huellas Ambientales, que permiten determinar puntos críticos y plantear alternativas tecnológicas para mejorar la eficiencia y que nos prepara para responder al desafío global de incrementar la producción de alimentos que permitan sostener el incremento de la población mundial y la demanda energética. En este contexto, la agricultura de precisión requiere una evolución tecnológica hacia el análisis de datos y las huellas ambientales.

Las **Huellas Ambientales**, en general, son un conjunto de indicadores del impacto generado por la demanda humana sobre los recursos de los ecosistemas del planeta, con respecto a la capacidad de la Tierra de regenerar sus recursos. Existen muchas huellas, dentro de las cuales la más conocida es la Huella de Carbono, que se define como "la suma de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, acontecimiento o producto". Este impacto ambiental se mide a través de un inventario de emisiones de GEI o un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), siguiendo estándares tales como ISO 14064, PAS 2050, etc. La huella de carbono se mide en cantidad de CO<sub>2</sub> equivalente. Una vez conocido el tamaño y la huella, se puede establecer una estrategia de mitigación y/o compensación de emisiones.

El ACV es una herramienta para estimar y evaluar los impactos ambientales atribuibles al ciclo de vida completo o parcial (solo las fases determinadas para el caso de estudio) de un producto, tales como cambio climático, eutrofización, acidificación, erosión de la capa de ozono, estrés toxicológico sobre la salud humana y de los ecosistemas. Permite así planificar y generar estrategias para alcanzar beneficios comerciales con un criterio ambiental, es decir lograr producciones más limpias. Además, entre otros beneficios, el ACV puede: a) combinarse con otros datos, tales como costo y eficiencia, para seleccionar productos o procesos que tengan el menor impacto sobre el ambiente; b) identificar la transferencia de impactos ambientales entre fases de un ciclo; c) desarrollar una evaluación sistemática de las consecuencias ambientales asociadas con un determinado producto / cultivo; d) identificar "cuellos de botella" tecnológicos que permitirían ser modificados, aportando mayor eficiencia energética, menor

impacto ambiental, y –a la vez- una reducción de costos y una optimización de la producción

En el sector agroalimentario su aplicación es relativamente nueva, y la mayoría de los problemas metodológicos no resueltos en la cadena agroalimentaria provienen de la etapa de producción primaria. Esto no es sorprendente ya que el ACV fue desarrollado para la evaluación de sistemas industriales y no de sistemas agropecuarios / agroalimentarios. El INTA acaba de aprobar una Plataforma sobre Huellas Ambientales, para analizar el impacto ambiental de las principales cadenas productivas de Argentina, la que se pondrá en marcha a mediados del 2019.

Cada vez más se comprende que las mejoras ambientales requieren de la cooperación de muchos actores en la cadena del producto: productores primarios, fabricantes y proveedores de servicios, comercio, distribuidores, organizaciones de compradores, y el consumidor final. Por eso es que la información ambiental puede ser incorporada en el flujo de información cotidiana entre los actores económicos; quienes también tienen que acordar y consensuar conceptos y estrategias de mejora ambiental.

La información ambiental cae a menudo en la categoría de demasiado compleja, y generalmente es ignorada en favor de indicadores mucho más simples, como por ejemplo, el económico. Para que el ACV provea beneficios reales para el proceso de toma de decisiones, necesita brindar información comprensible (incluyendo el etiquetado), en un formato amigable y sobre un amplio rango de factores ambientales relevantes. De esta manera, se contribuirá a incorporar el aspecto ambiental en todos los niveles decisores del sector agro-industrial transformándose así, en otro factor a considerar, además del económico, para la toma de decisiones.

El ACV se puede combinar con otros datos, tales como geoposicionamiento, costo y eficiencia, para seleccionar productos o procesos que tengan el menor impacto sobre el ambiente. El ACV identifica la transferencia de impactos ambientales de un medio a otro (ej., la eliminación de emisiones de gases a través de la creación de un residuo líquido) y/o del paso de un ciclo de vida a otro. Permite desarrollar una evaluación sistemática de las consecuencias ambientales asociadas con un determinado producto / cultivo. Identifica "cuellos de botella" o "hot spots" tecnológicos que permitirían ser modificados, aportando mayor eficiencia energética, menor



impacto ambiental, y –a la vez- una reducción de costos y una optimización de la producción.

En forma paralela al desarrollo de las metodologías de ACV, en los últimos años se han desarrollado diversos indicadores para ilustrar el nivel de sostenibilidad de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios de las sociedades, como los relacionados a la **Economía Circular**, un nuevo modelo económico que busca modificar los sistemas de producción y consumo en pos de la sostenibilidad. Plantea reutilizar los bienes que actualmente se consideran residuos para lograr un uso más eficiente de los recursos. Así, se convierten los residuos en materias primas que reingresen al sistema productivo para luego generar un nuevo bien (Bongiovanni R. , 2018).

La economía circular se presenta en oposición a la economía lineal, es decir, aquella en la que se generan bienes a partir de materias primas, y luego de su consumo se transforman en residuos. La finalidad de la economía circular es “cerrar el ciclo de vida” de los bienes, alargando el tiempo de utilidad de los recursos y reduciendo los residuos a través de su recuperación y regeneración. Una economía circular aborda los crecientes desafíos relacionados con los recursos y podría generar crecimiento, crear empleo y reducir los efectos medioambientales, incluidas las emisiones de carbono. La Fundación Ellen MacArthur es pionera en la promoción de la economía circular, basándose en tres principios:

- Promover la reutilización de los recursos y la sustitución de materias primas, creando condiciones para la regeneración.
- Optimizar el rendimiento de los recursos a través de la rotación, tanto en los ciclos técnicos como en los biológicos.
- Eliminar las externalidades negativas de la actividad humana en términos de contaminación.

Un ejemplo de Economía Circular en el sector agropecuario de Argentina es la planta de recupero de residuos plásticos de la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA) ubicada en Cañada de Gómez, Santa Fe. De las 70.000 toneladas de residuos plásticos que se generan en el país, ACA reprocesa el 10% (6.000 toneladas de silo bolsa y 1.000 toneladas de bidones), a través de una logística inversa. Una vez usado el plástico, las cooperativas asociadas tienen que devolverlos para que lleguen a la planta y procesarlas, buscando un balance neutro de Huella de Carbono.

La economía circular se propone como un camino para crear procesos de producción y consumo sustentables para la economía mundial. Sin embargo, alcanzar ese objetivo será un desafío que deberán atravesar conjuntamente el sector público, el sector privado y la sociedad civil. A nivel agregado, la economía circular tiene el potencial de generar una economía sostenible utilizando de manera más eficiente los recursos. Para las empresas privadas, puede no solo representar un ahorro a nivel económico, sino que también puede ser aprovechado para generar una diferenciación de sus marcas.

#### 4. Conclusiones

Este trabajo se basa en la observación de que la adopción generalizada de una tecnología es un buen indicador de su rentabilidad y/o de otros beneficios económicos. Teniendo esto en cuenta, se revisaron los datos disponibles públicamente sobre el uso de la agricultura de precisión, se identificó el grado en que la investigación económica predijo correctamente las tecnologías de AP que eventualmente serían adoptadas por los agricultores y destacó algunas tecnologías de AP que la investigación económica se ha identificado recientemente como potencialmente rentable y susceptible de adopción.

La adopción masiva de la agricultura inteligente en general, y de la agricultura de precisión en particular, se va a dar como conocimiento empaquetado, probablemente con sensores que manden los datos a un nodo, y que vuelvan como información para actuar en tiempo real. Los robots agrícolas van a replantar toda la mecanización, cuando el ser humano ya no pueda manejar equipos cada vez más grandes. En este contexto, Big Data e Internet de las Cosas serán los fundamentos para el análisis de datos y para la toma de decisiones automatizadas.

La agricultura ambientalmente inteligente debe incluir el estudio de las huellas ambientales, cuyos resultados pueden ser usados para que las propias empresas trabajen en la mejora continua de la gestión ambiental interna; para comparar el desempeño interno de una cadena o en comparación con otros países; como herramienta de marketing, competencia, y diferenciación; para brindar información a los consumidores, a los mercados nacionales/internacionales; o como herramienta para gestionar políticas de apoyo al sector y/o a la región para el uso de tecnologías más eficientes.

## 5. Bibliografía

- Agrawal, A., Gans, J., & Goldfarb, A.** 2016. The Simple Economics of Machine Intelligence. Traducción propia. Obtenido de Harvard Business Review: <https://hbr.org/2016/11/the-simple-economics-of-machine-intelligence>
- BI Intelligence.** 2015. OnFarm Estimates. BI Intelligence.
- Biermacher, J., Brorsen, W., Epplin, F., Solie, J., & Raun, W.** 2009. The economic potential of precision nitrogen application with wheat based on plant sensing. *Agricultural Economics* 40, 397-407.
- Blackmore, S., Fountas, S., Tang, L., & Have, H.** 2004. System Requirements for a Small Autonomous Tractor. Obtenido de Agricultural Engineering International: the CGIAR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript PM 04 001. July 2004: <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/525>
- Bongiovanni, R.** 2017. Agricultura Inteligente. Revista Agropost, del Consejo de los Profesionales del Agro, Alimentos y Agroindustria, CPIA. Febrero / Marzo 2017. Número 148. Capacitación + Comunicación = Conocimiento, 14-17.
- Bongiovanni, R.** 2018. ¿Hacia Dónde va la Economía Verde? Revista Intuición y Formación IF N° 16, Noviembre 2018. Pp. 57-64 <http://revistaif.com.ar/hacia-donde-va-la-economia-verde/>. Córdoba: IF.
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J.** 2006. Argentina. Chapter 21. En A. Srinivasan, *Handbook of Precision Agriculture* (págs. 615-633). New York: Food Products Press / Haworth Press.
- Bongiovanni, R., Mantovani, E., Best, S., & Roel, A.** 2006. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Obtenido de PROCISUR / IICA: <http://www.procisur.org.uy/images/biblioteca/135050.pdf>
- Bongiovanni, R., Robledo, C., & Lambert, D.** 2007. Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 13-24.
- Business Insider.** 2016. Business Insider. Obtenido de Internet of Things & Smart Agriculture: <http://www.businessinsider.com/internet-of-things-smart-agriculture-2016-10>
- Cook, S., Adams, M., & Bramley, R.** (2000). What is obstructing the wider adoption of precision agriculture technology?. In: Robert, P.C.; Rust, R.H; Larson, W.E. Eds, editor/s. *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*. Minneapolis, Minnesota, USA, 16-19 July 2000: ISPA.
- CropLife / Purdue University.** 2019. Purdue University, USA – the CropLife/Purdue survey reports. Obtenido de Center for Food and Agricultural Business (CAB): <http://agribusiness.purdue.edu/resources>
- DEFRA.** 2013. Department for Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA). Obtenido de Farm Practices Survey Autumn 2012 – England (March, 2013): [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/181719/defra-stats-foodfarm-enviro-fps-stats-release-autumn2012edition-130328.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/181719/defra-stats-foodfarm-enviro-fps-stats-release-autumn2012edition-130328.pdf)
- Diacono, M., Rubino, P., & Montemurro, F.** 2013. Precision nitrogen management of wheat: A Review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 219-241.
- Espósito, G.** 2013. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Obtenido de Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Córdoba. Tesis doctoral: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/1497>
- Fundación Sadosky.** (15 de Diciembre de 2016). Proyecto Palenque. Obtenido de <http://www.fundacionsadosky.org.ar/palenque/>
- Griffin, T., Lambert, D., & Lowenberg-DeBoer, J.** 2005. Economics of GPS Lightbar Navigation and Auto-Guidance Technologies. En J. (. Stafford, *Precision Agriculture-2005* (págs. 581-587). Wageningen Academic Publishers: The Netherlands.
- Kitchen, N.** 2008. Emerging technologies for real-time and integrated agriculture decisions. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 1-3.
- Lambert, D., & Lowenberg-DeBoer, J.** 2000. Precision Farming Profitability Review. Obtenido de Site Specific Management Center, Purdue University: [www.purdue.edu/ssmc](http://www.purdue.edu/ssmc)
- Lawson, G., L., Pedersen, S. M., Sørensen, C. G., Pesonen, L., Fountas, S., . . . Blackmore, S.** 2011. A four nation survey of farm information management and advanced farming systems: A descriptive analysis of survey responses. *Computers and Electronics in Agriculture* 77, 7-20.
- Lewellyn, R., & Ousman, J.** 2014. Adoption of Precision Agriculture-related Practices: Status, Opportunities and the Role of Farm Advisors. Obtenido de CSIRO: [https://grdc.com.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0024/208653/adoption-of-precision-agricultural-related-practices-status-opportunities-and-the-role-of-farm-advisers-2014.pdf](https://grdc.com.au/_data/assets/pdf_file/0024/208653/adoption-of-precision-agricultural-related-practices-status-opportunities-and-the-role-of-farm-advisers-2014.pdf)
- Li, M., & Yost, R.** 2000. Management-Oriented Modeling: Optimizing Nitrogen Management with Artificial Intelligence. *Agricultural Systems* 65, 1-27.

- Lowenberg-DeBoer, J.** 1998. Adoption Patterns for Precision Agriculture. Obtenido de Agricultural Machine Systems, SP-1383. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. SAE Technical paper 982041: [www.sae.org/PRODSERV/papers/982041.htm](http://www.sae.org/PRODSERV/papers/982041.htm)
- Lowenberg-DeBoer, J.** 1999. GPS Based Guidance Systems for Agriculture. Obtenido de Purdue Agricultural Economics Report, Purdue University, December, 1999, p. 8 & 9: [https://ag.purdue.edu/agecon/Documents/PAER\\_December%201999.pdf](https://ag.purdue.edu/agecon/Documents/PAER_December%201999.pdf)
- Lowenberg-DeBoer, J.** 2019. The economics of precision agriculture. En J. Stafford, Precision agriculture for sustainability, <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2017.0032.19>. Cambridge, UK, 2019, (ISBN: 978 1 78676 204 7; [www.bdsublishing.com](http://www.bdsublishing.com)): Burleigh Dodds Science Publishing.
- Mayer-Schönberger, V.** 2016. Regulación y gestión de internet. Obtenido de Internet Institute de la Universidad de Oxford: [http://www.eldiario.es/turing/Big-data\\_0\\_161334397.html](http://www.eldiario.es/turing/Big-data_0_161334397.html)
- Molin, J.** 2017. Precision Agriculture in Latin America . INFO AG Conference, August 3, 2017. St. Louis, Missouri, USA: <https://www.infoag.org/presentations/2378.pdf>.
- OCDE.** 1994. National Systems of Innovation: General Conceptual Framework. Obtenido de DSTI/STP/TIP (94), 4, Francia.
- OCDE.** 2016. Farm Management Practices to Foster Green Growth, OECD Publishing, Paris. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1787/9789264238657-en>
- Pedersen, S. M., Fountas, S., Sørensen, C. G., Evert, F. K., & Blackmore, B. S.** 2017. Robotic Seeding: Economic Perspectives. En S. Pedersen, & K. Lind, Chapter 8 in Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives. Springer International Publishing.
- Salfer, J., Endres, M., Lazarus, W., Minegishi, K., & Berning, B.** 2017. Dairy Robotic Milking Systems – What are the Economics? Obtenido de University of Minnesota Extension, Oct. 3, 2017: <http://articles.extension.org/pages/73995/dairy-robotic-milking-systems-what-are-the-economics>
- Scaramuzza, F., Villarroel, D., & Velez, J. P.** 2018. Incremento de las herramientas de agricultura de precisión. Mayor automatismo y precisión para la sustentabilidad del ambiente productivo. Obtenido de INTA: [www.agriculturadeprecision.org](http://www.agriculturadeprecision.org)
- Scharf, P., Shannon, K., Palm, H. L., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Kitchen, N. R., . . . Olivera, L. F.** 2011. Sensor-Based Nitrogen Applications Out-Performed Producers-Chosen Rates for Corn in On-Farm Demonstrations. Obtenido de Agronomy Journal 103:6 (2011), p. 1683-1691: <http://extension.missouri.edu/sare/documents/ProducerStudies2012.pdf>
- Schimmelpfennig, D.** 2016. Farm Profits and the Adoption of Precision Agriculture, USDA Economic Research Service, Economic Research Report 217. Washington: USDA.
- SRI.** 2008. Consulting Business Intelligence/National Intelligence Council. Obtenido de Appendix F of Disruptive Technologies Global Trends 2025 page 1. Figure 15 (Background: The Internet of Things). A technology roadmap of the Internet of Things.: [https://www.dni.gov/nic/PDF\\_GIF\\_confreports/disruptivetech/appendix\\_F.pdf](https://www.dni.gov/nic/PDF_GIF_confreports/disruptivetech/appendix_F.pdf)
- Swinton, S., & Lowenberg-DeBoer, J.** 1998. Evaluating the Profitability of Site-Specific Farming. Journal of Production Agriculture, 11, 439-446.
- Tenkorang, F., & Lowenberg-DeBoer, J.** 2008. On-Farm Profitability of Remote Sensing in Agriculture. Obtenido de Journal of Terrestrial Observation, 1(1) (2008), p. 50-59: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1025&context=jto>
- USDA.** 2018. Tailored Reports: Crop Production Practices. Obtenido de <https://data.ers.usda.gov/reports.aspx?ID=17883>
- WEF.** 2017. Estas son las 10 tecnologías emergentes más importantes de 2017. Obtenido de World Economic Forum: <https://www.weforum.org/es/agenda/2017/07/estas-son-las-10-tecnologias-emergentes-mas-importantes-de-2017/>
- WEF.** 2019. Las 10 tecnologías que revolucionarán el mundo según bill gates. Obtenido de World Economic Forum: <https://es.weforum.org/agenda/2019/03/las-10-tecnologias-que-revolucionaran-el-mundo-segun-bill-gates/>
- Wolfert, S., Lan Ge, C. V., & Bogaardt, M.-J.** 2017. Big data in Smart Farming – A Review. Agricultural Systems 153, 69-80.
- Zarco-Tejada, P., Hubbard, N., & Loudjani, P.** 2014. Precision Agriculture: An Opportunity for EU Farmers – Potential Support with the CAP 2014-2020. Obtenido de Directorate General for Internal Policies, Policy Department B: Structural and Cohesion Policies, European Parliament Committee on Agriculture and Rural Development: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI\\_NT%282014%29529049\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/note/join/2014/529049/IPOL-AGRI_NT%282014%29529049_EN.pdf)
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N.** 2002. Precision Agriculture – a Worldwide Overview. Computers and Electronics in Agriculture, 36, 113-132. ◀

## ¿Que es intensificar cultivos sustentablemente?

Juan Pablo Monzón

CONICET – Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP)

monzon.jp@gmail.com

La producción agrícola global debe aumentar significativamente para satisfacer la mayor demanda de alimentos en las próximas décadas. Las estrategias para aumentar la producción de granos, mientras se mantiene el área de cultivo actual, pueden centrarse en i) la intensificación de cultivos individuales, incluido el aumento del rendimiento potencial y el cierre de la brecha de rendimiento ([www.yieldgap.org](http://www.yieldgap.org)), ii) el aumento de la intensidad de cultivo, o iii) una combinación de los mismos. Cualquier cambio de estas variables para Argentina puede tener un alto impacto a nivel mundial, porque somos el tercer productor de granos de América ([faostat.fao.org](http://faostat.fao.org)) con un área de producción de cultivos de 32 millones de hectáreas y debido a nuestra baja población, somos autosuficientes. Por lo tanto, cualquier cambio en la producción de cultivos implicará aumentos de los saldos exportables, lo que contribuirá a la seguridad alimentaria mundial.

En los últimos 15 años, los sistemas de cultivo en Argentina han experimentado enormes cambios en el uso de la tierra y la tecnología: el área de cultivo aumentó aproximadamente 0,9 Mha año<sup>-1</sup> (principalmente soja), impulsada por una amplia adopción de un paquete de tecnología que incluye la siembra directa, cultivos transgénicos y dosis crecientes de fertilizantes. La expansión de la tierra cultivable se produjo principalmente en la región pampeana en suelos agrícolas que anteriormente se utilizaban para la producción ganadera. Sin embargo, en los últimos años, el área de cultivo también se ha expandido más allá de esta región, a la región semiárida de Chaco, expandiendo la frontera agrícola. Este proceso aún continúa, pero no está claro cuánta más área de cultivo puede expandirse, ya que está influenciada por varios factores, como los precios de los granos, las decisiones políticas y las preocupaciones ambientales. Algunas estimaciones predicen que el área de cultivo en Argentina se estabilizará entre 37 y 40 millones de hectáreas para 2020. Esto implica un aumento en el área de cultivo entre 15% a 25%, pero esto no significa necesariamente un aumento proporcional en la

producción de grano, porque la mayoría de las áreas a incorporar son menos productivas y más frágiles que el área cultivada actual.

Otra opción para intensificar el uso de la tierra agrícola consiste en sembrar dos o más cultivos por año como cultivos dobles, cultivos de relevo o cultivos intercalados. En Argentina, el doble cultivo de soja después de la cosecha de un cereal de invierno es una práctica común. Para las especies de verano, una opción es el cultivo doble, que consiste en maíz o girasol seguido de la cosecha de soja como segundo cultivo. Sin embargo, la duración limitada de la temporada de crecimiento restringe esta opción para la mayoría de las regiones agrícolas de Argentina.

En cualquier alternativa de intensificación que involucre dos o más cultivos, el rendimiento reducido de los componentes individuales del cultivo se puede contrarrestar con un aumento en el rendimiento total de grano en una base anual. Las condiciones climáticas, que varían ampliamente en las Pampas de Argentina, son un factor clave para el éxito de las alternativas de intensificación. El período libre de heladas aumenta principalmente de sur a norte, y también de oeste a este, con la temperatura siguiendo un patrón similar. Las precipitaciones aumentan en dirección noreste, y el patrón de precipitación es monzónico en el oeste y se vuelve más isohidro en el este de la región (Hall et al., 1992; Calviño y Monzón, 2009). En consecuencia, la viabilidad de las alternativas de intensificación de verano está condicionada regionalmente por las condiciones climáticas.

El rendimiento de los agricultores argentinos ha aumentado significativamente en los últimos 20 años, debido a un incremento en el potencial de rendimiento de los cultivos, una mejora general de las prácticas agronómicas, y su interacción (Aramburu Merlos et al., 2015). Los potenciales de rendimiento seguirán aumentando, pero es poco probable que se encuentre a la tasa requerida para satisfacer la demanda de grano en 2050. A pesar de los efectos de los avances genéticos y la mejora en el manejo, las prácticas no pue-



den separarse, los incrementos en el potencial de rendimiento de los cultivos generalmente están altamente correlacionados con los incrementos en el rendimiento de los agricultores. La diferencia entre el potencial de rendimiento (o el rendimiento limitado por el agua en sistemas de secano) y el rendimiento real se conoce como la brecha de rendimiento, y es una estimación útil de la capacidad de producción de alimentos sin explotar y el estado actual de los sistemas de cultivo de una región. La Argentina tiene un potencial para aumentar sustancialmente la producción de granos de soja, trigo y maíz, en 7.4, 5.2 y 9.2 Mt respectivamente, sin expandir el área de cultivo.

## Bibliografía

- Aramburu Merlos, F., Monzón, J.P., Mercáu, J.L., Taboada, M., Andrade, F.H., Hall, A.J., Jobbagy, E., Cassman, K.G., Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Res.* 184, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.001>.
- Calviño, P., Monzón, J. 2009. Farming systems in Argentina: yield constraints and risk management. *In* Sadras, V.O., Calderini, D.F. (Ed.), *Crop Physiology*. Elsevier, Amsterdam, pp. 55–70.
- Hall A J, Rebella C M, Ghera C M y Culot J P. 1992. Field-crop systems of the Pampas. p. 413–450. *In* C. J. Pearson (ed). *Ecosystems of the world. Field Crop Ecosystems*. Elsevier Scientific, Amsterdam-London-New York-Tokyo ◀



# Cultivos de servicios y nutrición del sistema: sincronizando los ciclos de los nutrientes

Gervasio Piñeiro<sup>1,2</sup>, Priscila Pinto<sup>1</sup> y Sebastián Villarino<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IFEVA-Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, CONICET.

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica, Uruguay.

<sup>3</sup> Unidad integrada Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP) – INTA, CONICET.  
pineiro@agro.uba.ar

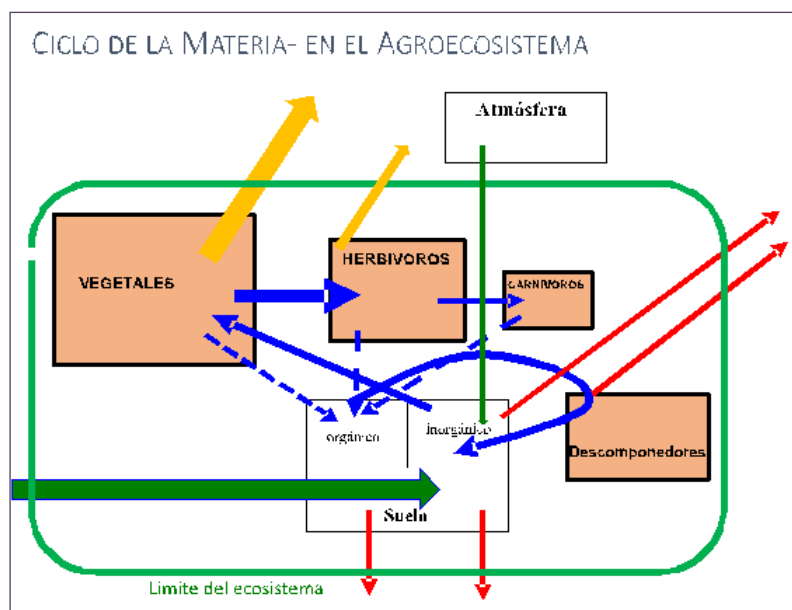
## Introducción

Uno de los aspectos más controversiales de la agricultura actual es el remplazo de ecosistemas maduros (ecosistemas naturales) por ecosistemas inmaduros (agroecosistemas). Este remplazo ocurre porque los ecosistemas inmaduros poseen una alta productividad primaria, que puede ser cosechada por los agricultores. Sin embargo, estos ecosistemas presentan una baja diversidad, pocas interacciones entre especies, baja resiliencia y ciclos de los nutrientes abiertos, entre otras propiedades ecológicas (Chapin et al., 2012). Debido a estas características, los ecosistemas inmaduros dejan de proveer algunos de los servicios ecosistémicos que llamamos de regulación y soporte, ya que están básicamente diseñados para producir servicios de abastecimiento (alimentos, fibras, biocombustibles, etc.) (Millenium Ecosystem Assessment, 2003). La falta de servicios de regulación y soporte, como el ciclado de los nutrientes, control de la erosión, mantenimiento de propiedades físicas del suelo, mantenimiento de polinizadores y la formación de materia orgánica del suelo, ha provocado un deterioro de los agroecosistemas (Ptacnik et al., 2005). Para mantener la productividad de los agroecosistemas, este deterioro ha sido contrarrestado con aumentos en el uso de insumos externos, provocando contaminación en los ecosistemas circundantes (Foley et al., 2005). Es por ello que resulta crucial el diseño de agroecosistemas que logren imitar algunas

de las propiedades de los ecosistemas maduros para poder revertir el deterioro ambiental y mantener la producción en el largo plazo (Crews & Rumsey, 2017). En este artículo nos centraremos en discutir los aspectos centrales del manejo y diseño de los agroecosistemas para mejorar el ciclado de los nutrientes.

## El ciclo de la materia

En los agroecosistemas, los ciclos de los nutrientes son abiertos porque intercambian mucha materia (nutrientes) con el exterior (Figura 1). Las salidas están dadas principalmente por las cosechas de los cultivos (flechas amarillas en Figura



**Figura 1.** Esquema conceptual simplificado del ciclo de la materia (o de los nutrientes) en un agroecosistema, usando como ejemplo el ciclo del nitrógeno. Las flechas azules muestran el reciclado interno del agroecosistema, las flechas rojas las pérdidas, las amarillas las extracciones por cosecha y la verde la entrada de nutrientes por fertilización o por deposición atmosférica.

1), pero también porque ocurren pérdidas de nutrientes provocadas por la desincronización temporal entre la oferta y la demanda de nutrientes (flechas rojas en **Figura 1**) y la incapacidad del suelo de retenerlos. Las entradas por fertilización (flecha verde) generalmente son menores a las salidas porque suelen responder a la demanda del cultivo y sólo se realizan para continuar produciendo cuando se agotan las reservas del suelo (Matson et al., 1997). Pero una alternativa sería pensar en fertilizar al ecosistema por medio de la reposición de todos los nutrientes exportados y mantener su reserva en la materia orgánica del suelo. Si bien cada elemento o nutriente posee un ciclo biogeoquímico particular, que es importante conocer para lograr su reciclaje en el ecosistema, en este artículo utilizaremos al nitrógeno como ejemplo, ya que es uno de los nutrientes que más limita el crecimiento de los cultivos.

La única forma de reponer sustentablemente las extracciones de nutrientes provocadas por las cosechas consiste en lograr que la materia cicle entre el campo y los puntos de consumo de los productos cosechados, que generalmente son las ciudades o los corrales de engorde de animales (feedlots) (Elser & Bennett, 2011). Para esto deberíamos capturar los nutrientes en los residuos sólidos y líquidos de los puntos de consumo para volverlos a utilizar como fertilizante en los campos agrícolas. Actualmente existen muchas tecnologías de reciclaje pero su aplicación suele ser muy limitada, principalmente por razones de gobernanza y económicas (Marald, 2002). Sin embargo, este reciclaje que es el eje central de la economía circular, representa la única opción que permitirá mantener la producción agropecuaria en el largo plazo y al mismo tiempo la provisión de diversos servicios ecosistémicos de regulación (Jurgilevich et al., 2016). Por lo tanto, aunque todavía pueda parecer difícil de lograr, deberíamos realizar nuestro máximo esfuerzo para alcanzarlo.

### **Sincronizar la liberación y absorción de nutrientes**

Además de las extracciones por cosechas, los agroecosistemas poseen pérdidas de nutrientes que pueden y deben ser evitadas (flechas rojas en **Figura 1**). Estas pérdidas de nutrientes de los agroecosistemas no solo disminuyen los conteni-

dos de nutrientes disponibles para la producción agropecuaria, sino que además provocan contaminación en el ambiente donde se acumulan, generalmente en cursos de agua, lagos y océanos (Nixon et al., 1996). Para disminuir al mínimo estas pérdidas, y parecerse a los ecosistemas naturales, es necesario diseñar agroecosistemas que posean sincronizada la oferta y la demanda de nutrientes. Para ello se debería pensar en la nutrición del suelo para mantener altas las reservas de nutrientes y energía almacenadas en la materia orgánica del suelo (Blanco-Canqui et al., 2015). De este modo, se podría favorecer una liberación de nutrientes más acoplada con la demanda de los cultivos debido a los diversos mecanismos que regulan la mineralización de la materia orgánica. A su vez, la materia orgánica del suelo cumple un rol fundamental en la provisión de otros servicios ecosistémicos que soportan la producción de los cultivos (descompactación y aireación del suelo, retención de agua, etc.) (Daily et al., 1997).

En los sistemas actuales de nuestra región con un cultivo al año, principalmente soja, la oferta de nutrientes por descomposición de residuos y la demanda de nutrientes por los cultivos se encuentra totalmente desacoplada. Por ejemplo, a principios de otoño, durante la senescencia y la cosecha de los cultivos de verano, se produce una gran liberación de los nutrientes contenidos en los tejidos vegetales. Si bien parte de estos nutrientes pueden ingresar y ser almacenados en la materia orgánica del suelo, otra parte importante es perdida principalmente como formas inorgánicas (lixiviación de nitratos o desnitrificación, por ejemplo, en el caso del ciclo del nitrógeno) (Caride et al., 2012). La cantidad de nutrientes que se pierden en ese momento del ecosistema, depende de la calidad y cantidad de los residuos aportados y del estado de "salud" del suelo, que determinará su capacidad de retener o no esos nutrientes en la materia orgánica edáfica (asumiendo que no hay cultivos de invierno que puedan tomar esos nutrientes). Solo estos dos factores determinarán las pérdidas ya que en ese momento no existe demanda de nutrientes por otros cultivos (pero si podrían aparecer, y lo hacen habitualmente, malezas que absorban esos nutrientes). Durante el fin del otoño, el invierno y principio de la primavera, se produce la descomposición de los residuos aportados por los cultivos, lo cual provoca que, en ausencia

de malezas, se acumulen nutrientes en formas inorgánicas en el suelo (amonio, nitratos, fósforo, potasio, cloro, calcio, magnesio y toda la tabla periódica!) que son altamente propensos a perderse del ecosistema, generando contaminación en los cursos de aguas. Sincronizar la oferta de nutrientes inorgánicos derivados de la descomposición de residuos vegetales, con la demanda de nutrientes generadas por el crecimiento de otros cultivos, debería ser un objetivo clave del diseño de la fertilización y la rotación de cultivos. Para esto, la cantidad y calidad de los residuos aportados y la dinámica de la materia orgánica son aspectos centrales a comprender.

### Nutrición del suelo y formación de la materia orgánica edáfica

La materia orgánica del suelo es un componente central en el reciclaje y almacenaje de los nutrientes en el ecosistema y, por lo tanto, debe ser considerada al momento de diseñar los sistemas productivos (Reeves, 1997). Si bien esto parece obvio, solo una minoría de productores agropecuarios, consideran a la materia orgánica del suelo un componente central en la nutrición de los cultivos. Esto podría deberse a que la dinámica de la materia orgánica del suelo es muy compleja, dificultando la estimación de su capacidad de aportes de nutrientes y de los manejos que son necesarios para restituirla. Sin embargo, en los últimos años se han realizado una serie de avances conceptuales que plantean nuevas estrategias para su manejo y monitoreo, facilitando la comprensión de su dinámica y la estimación de su aporte potencial de nutrientes (Schmidt et al., 2011). Los modelos más recientes, sugieren que la materia orgánica del suelo esta compuesta por dos fracciones bien distintas en cuanto su composición y dinámica dentro suelo, que pueden separarse por su tamaño de partícula mediante el uso de tamices (Abramoff et al., 2018). La fracción particulada (POM, por su siglas en inglés particulate organic matter), que está compuesta por restos vegetales aún no descompuestos y la fracción asociada a los minerales (MAOM, por su siglas en inglés mineral associated organic matter), que está compuesta principalmente por moléculas de origen microbiano retenidas (mediante cargas) y protegidas físicamente de la descomposición por las partículas de arcillas y limos en suelo (Cambardella & Elliott, 1993). Contrario a lo que se pensaba

anteriormente, ambas fracciones pueden aportar nutrientes a los cultivos, pero difieren radicalmente en las posibles estrategias para formarlas. Es por lo tanto importante considerar la "nutrición" del suelo necesaria para reponer ambas fracciones y lograr entonces que continúen aportando nutrientes en tiempo y forma para los cultivos.

Pensar la "nutrición" del suelo, es decir la cantidad y calidad de los residuos aportados, es clave para la formación de la materia orgánica edáfica. La calidad de los residuos depende fuertemente de su estequiometría, es decir de la relación que hay entre los distintos elementos en la biomasa (Cotrufo et al., 2015; Silver & Miya, 2001). Por ejemplo, la estequiometría de la mayoría de los tejidos animales es en general 100C/10N/1P. Diez a uno para carbono/nitrógeno (C/N) y cien a uno para carbono/fósforo (C/P). Los residuos vegetales varían en su estequiometría dependiendo de la especie, el estado fenológico y el tipo de órgano que les dio origen (Figura 2). Residuos de alta C/N, es decir de baja calidad, son difíciles de descomponer por los microorganismos del suelo, ya que para formar tejidos microbianos se necesita una C/N de 10 (10 carbonos/1 nitrógeno). Como los microorganismos necesitan energía para desarrollarse y la obtienen de los enlaces de carbono de los residuos que comen, un re-



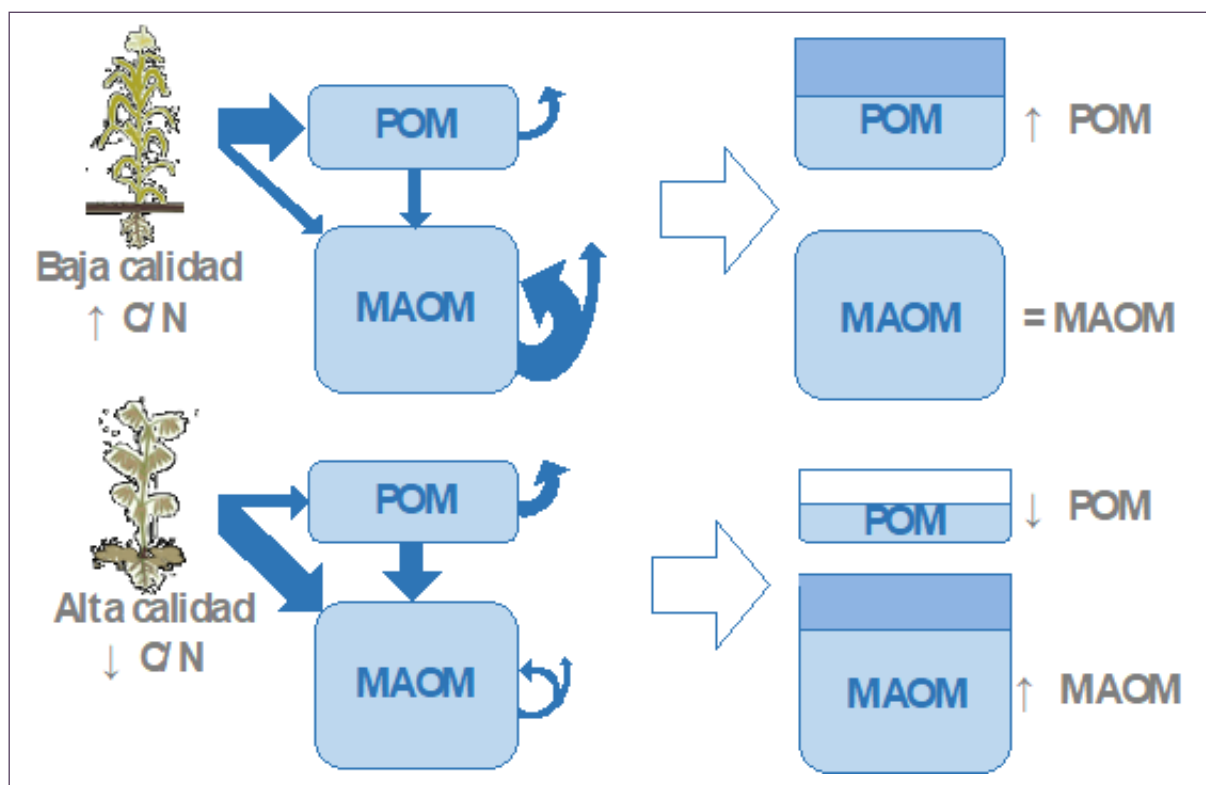
Figura 2. Relación carbono/nitrógeno de rastrojos y otros materiales orgánicos (Tomado de USDA, soils.usda.gov/sqj).



lación C/N de 24 es la que más eficientemente forma microorganismos (Manzoni et al., 2008). Residuos con esa estequiometría estimularán el crecimiento de poblaciones de microorganismos, que son las que luego, morirán o producirán exoenzimas y otras sustancias que formarán parte de la MAOM (Figura 3). Por el contrario, residuos de alta C/N tendrán una descomposición lenta y, por lo tanto, favorecerán la formación de POM (Figura 3) (Cotrufo et al., 2013).

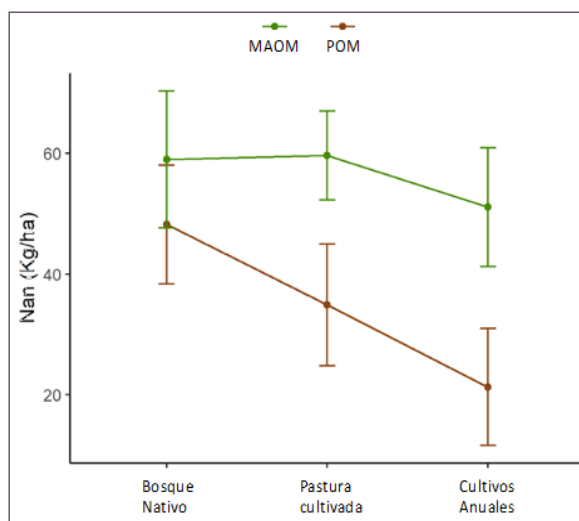
En los últimos años también se ha avanzado en la comprensión de la eficiencia de formación de materia orgánica del suelo que tienen los distintos componentes de las plantas. La eficiencia de formación de la materia orgánica (comúnmente llamada humificación) de las raíces es cerca de 5 veces superior a la de la biomasa aérea dejada en superficie (Jackson et al., 2017; Mazzilli et al., 2015). En términos generales podemos decir que solamente el 5% de los rastrojos dejados en superficie terminarán formando materia orgánica del suelo al plazo de uno o dos años. Sin

embargo, casi el 50% de la biomasa de raíces estará formando materia orgánica del suelo en el mismo plazo. Esta mayor eficiencia de formación de la materia orgánica por parte de las raíces se debe a diversas razones. Por un lado, a una mayor recalcitrancia (es decir que su composición química dificulta la descomposición) y a un contacto íntimo con los agregados del suelo, lo cual aumenta la eficiencia de formación de POM. Por otro lado, la rizodeposición (los aportes de sustancias orgánicas por exudados radicales y aportes de biomasa por crecimiento y muerte de raíces finas) favorece la formación de MAOM (Villarino et al., en preparación). Es así como la producción de raíces es altamente eficiente en la formación de ambas fracciones de la materia orgánica del suelo. Es por ello que deberíamos aumentar los aportes de biomasa subterránea en los agroecosistemas sembrando cultivos que presenten una alta partición raíz/tallo.



**Figura 3.** Efectos del agregado de residuos de cultivos de distinta calidad en la formación de materia orgánica particulada (POM) y asociada a los minerales (MAOM). Residuos de baja calidad aumentan la formación de POM y el reciclaje de MAOM. Residuos de alta calidad disminuyen la formación de POM, pero aumentan la formación de MAOM.

Conocer la cantidad de nutrientes que puede aportar la materia orgánica del suelo a los cultivos es clave para el manejo de la fertilización. Distintos métodos estiman la capacidad potencial de aporte de nitrógeno de la materia orgánica del suelo. Uno de los más utilizados es el "Nan", o nitrógeno potencialmente mineralizado en condiciones anaeróbicas (Reussi Calvo et al., 2018). El análisis de Nan representa una herramienta muy útil para estimar los aportes totales de N (y por lo tanto de otros nutrientes) durante la descomposición de la materia orgánica del suelo. Recientemente, este indicador se ha utilizado en combinación con las técnicas de fraccionamiento de tamices que separan la POM y la MAOM, lo cual ha permitido estimar el nitrógeno potencialmente mineralizable en cada fracción. En la mayoría de los estudios, el Nan aumenta al aumentar la POM, lo cual ha llevado a pensar que los mayores aportes de nitrógeno para el cultivo provienen de la POM. Sin embargo, trabajos recientes muestran que la mayor parte del nitrógeno aportado por la materia orgánica del suelo a los cultivos proviene de la MAOM (Figura 4) (Talab et al., en preparación). Estos resultados sugieren que manejos que mantengan o aumenten los contenidos de MAOM ayudarán a mantener una adecuada nutrición de los cultivos.



**Figura 4.** Nitrógeno anaeróbico mineralizado (Nan) por las distintas fracciones de la materia orgánica del suelo bajo distintos usos en el Chaco Semiárido, Santiago del Estero, Argentina. POM es materia orgánica del suelo particulada y MAOM es materia orgánica del suelo asociada a los minerales.

La provisión de nutrientes para los cultivos puede provenir de cuatro fuentes distintas: pueden ser aportados por la materia orgánica del suelo, por los residuos de otros cultivos en descomposición, por los fertilizantes (ya sean orgánicos o inorgánicos) o mediante deposiciones atmosféricas. En el caso del nitrógeno se podría sumar una quinta fuente por medio de las leguminosas que pueden tomar este elemento del aire. Los cultivos absorberán los nutrientes del pool inorgánico del suelo, un pool pequeño y generalmente muy lábil, que es abastecido por alguna de las cuatro fuentes mencionadas anteriormente (asumiendo que la meteorización de las rocas es un proceso muy lento que no aporta nutrientes significativamente a escalas temporales cortas). A su vez, los nutrientes de los fertilizantes, de las deposiciones atmosféricas y de los residuos vegetales pueden pasar a formar parte de la materia orgánica del suelo. Si no son descompuestos formarán parte de la POM (solo para los residuos vegetales y para los fertilizantes orgánicos) y si son inmovilizados por microorganismos pueden luego formar parte de la MAOM (Cotrufo et al., 2015). Es importante entonces, considerar estas cuatro fuentes de nutrientes al diseñar las rotaciones y las estrategias de fertilización en los agroecosistemas.

A modo de síntesis, la estrategia de nutrición de los cultivos debería estar basada tanto en la sincronización del ciclo de los nutrientes como, en la generación de materia orgánica del suelo. Es decir, que por un lado deberíamos intentar sincronizar la oferta de nutrientes, que se liberan por medio de la descomposición de los residuos vegetales, con la demanda de los cultivos. De este modo, no solo garantizará una buena nutrición de los cultivos, sino que también se evitarán las pérdidas de nutrientes del sistema y la contaminación de cursos de agua. Pero a la vez, deberíamos pensar en mantener los reservorios de materia orgánica de manera de que sean capaces de abastecer la demanda de los cultivos. En este sentido, es importante aumentar la producción de raíces de los cultivos para maximizar la eficiencia de formación de la materia orgánica (Rasse et al., 2005). A su vez, los aportes de residuos al suelo deberán contener calidades adecuadas, relaciones C/N cercanas a 24, y ser relativamente constante en el tiempo. Los pulsos de aportes provocarán pulsos de descomposición, liberando gran cantidad de nutrientes inorgánicos que, si no son absorbidos por los vegeta-

les o inmovilizados por los microorganismos, serán perdidos del sistema. El aporte de residuos de alta C/N favorecerá la formación de POM, pero podrá aumentar la descomposición de la MAOM, ya que los microorganismos tomarían los nutrientes de esta fracción para descomponer los residuos aportados (fenómeno conocido como priming por nitrógeno) (Figura 3). Ya que la MAOM es la fracción que aporta más nutrientes a los cultivos, parecería importante aportar residuos de baja C/N en proporciones importantes. Sin embargo, aportes de residuos con muy baja C/N podrían provocar un aumento en la descomposición de la POM (fenómeno conocido como priming por energía) (Figura 3). Por lo tanto, lograr una nutrición balanceada del suelo parecería ser la mejor estrategia para formar de manera eficiente (es decir, sin pérdidas de nutrientes del sistema), la mayor cantidad de materia orgánica del suelo en ambas fracciones.

### Los cultivos de servicios para nutrir el sistema

Los cultivos de servicio pueden ser una herramienta viable para concretar esta nueva estrategia de nutrición sistémica, porque logran mejorar diversos procesos del ciclado de nutrientes que favorecen la nutrición de los cultivos. Por un lado, pueden nutrir el suelo y formar materia orgánica, pueden capturar nutrientes plausibles de perderse y pueden ser usados también para nutrir directamente a los cultivos de renta subsiguientes. Apuntar a formar materia orgánica del suelo para que ésta garantice la provisión de nutrientes durante del desarrollo de los cultivos, representa un primer paso en la visión sistémica de la fertilización. Para lograr este objetivo, será necesario incluir cultivos de servicios en la rotación que aporten residuos con relaciones C/N cercanas a 24 al momento de su supresión. Esto podría lograrse variando las especies en las mezclas de los cultivos de servicios o cambiando la fecha de supresión. Además, sería importante sembrar cultivos de servicios que produzcan grandes cantidades de raíces finas. La medición de la producción de raíces y la rizodeposición de los cultivos de servicios debería ser una prioridad en las agendas de investigación y desarrollo de estos cultivos (incluso también de los cultivos de renta) (Kell, 2011). Por otro lado, los cultivos de servicio podrían crecer en los momentos de alta disponibilidad de nutrientes, como ser

durante la senescencia de los cultivos de renta, para aumentar la captura de nutrientes y reducir las pérdidas (Thapa et al., 2018). Por lo tanto, es importante evaluar estrategias de siembras pre-cosecha de los cultivos de servicio, para sincronizar la oferta de nutrientes realizada durante la descomposición de los cultivos de renta con la absorción de los cultivos de servicio. Finalmente, si el objetivo es nutrir directamente al cultivo de renta, la finalización del cultivo de servicio deberá realizarse en el momento adecuado para lograr sincronizar su descomposición y liberación de nutrientes con los momentos de máxima demanda de los cultivos de renta.

El consumo de agua por parte los cultivos de servicios, debe ser evaluado con precisión para no comprometer el agua disponible para los cultivos de renta. Diversos trabajos muestran como los cultivos de servicios pueden consumir agua en sus etapas finales afectando negativamente el agua disponible para el cultivo siguiente. Otros trabajos muestran como los cultivos de servicios aumentan el agua disponible para los cultivos siguientes, principalmente a través de mejoras en la infiltración y disminuciones en la evaporación directa por efectos del restrojo del cultivos de servicio (Unger & Vigil 1998). El balance entre ambos efectos dependerá de varios factores, como el tipo de suelo, las precipitaciones, el momento de supresión, el consumo de agua por parte del cultivo de servicio, etc. Los cultivos de servicios, pueden ser usados además para brindar otros servicios como, bajar las napas en casos de excesos hídricos, control malezas, descompactar, reducir la erosión, etc.

Es necesario establecer líneas de investigación en fertilización sistémica de agroecosistemas y el manejo de cultivos de servicios, las cuales solo pueden ser realizadas mediante articulaciones de largo plazo entre instituciones públicas y privadas. Las instituciones públicas de investigación tienen un rol fundamental en la investigación sistémica y de tecnologías de procesos, por lo cual debería ser una prioridad para estas instituciones. Las instituciones privadas de investigación, que desarrollan principalmente tecnología de insumos, deberían complementarse adecuadamente con las instituciones públicas para lograr la sustentabilidad de la producción. Las organizaciones de productores y el Estado deberían ayudar a compatibilizar ambos objetivos.

## Bibliografía

- Abramoff, R. et al.**, 2018. The Millennial model: in search of measurable pools and transformations for modeling soil carbon in the new century. *Biogeochemistry*, 137(1–2), pp.51–71. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0409-7>.
- Blanco-Canqui, H. et al.**, 2015. Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*, 107(6), pp.2449–2474.
- Cambardella, C.A. & Elliott, E.T.**, 1993. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, 56(1–4), pp.449–457.
- Caride, C., Piñeiro, G. & Paruelo, J.M.**, 2012. How does agricultural management modify ecosystem services in the Argentine Pampas? The effects on soil C dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 154.
- Chapin, F.S., Matson, P.A. & Vitousek, P.M.**, 2012. Principles of terrestrial ecosystem ecology.
- Cotrufo, M.F. et al.**, 2013. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, p.n/a-n/a. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.12113> [Accessed February 28, 2013].
- Cotrufo, M.F. et al.**, 2015. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nature Geoscience*, 8(10), pp.776–779. Available at: <http://www.nature.com/doi/10.1038/ngeo2520>.
- Crews, T.E. & Rumsey, B.E.**, 2017. What agriculture can learn from native ecosystems in building soil organic matter: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 9(4), pp.1–18.
- Daily, G.C., Matson, P.A. & Vitousek, P.M.**, 1997. Ecosystem services supplied by soil. In *Natures services*.
- Elser, J. & Bennett, E.**, 2011. Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle. *Nature*, 478(7367), pp.29–31.
- Foley, J. a J.J. a et al.**, 2005. Global Consequences of Land Use. *science*, 309(July), pp.570–574. Available at: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3345016&tool=pmcentrez&render-type=abstract> [Accessed July 31, 2013].
- Jackson, R.B. et al.**, 2017. The Ecology of Soil Carbon : Pools , Vulnerabilities , and Biotic and Abiotic Controls. , (August), pp.419–445.
- Jurgilevich, A. et al.**, 2016. Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability (Switzerland)*.
- Kell, D.B.**, 2011. Breeding crop plants with deep roots: their role in sustainable carbon, nutrient and water sequestration. *Annals of botany*, 108(3), pp.407–18. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pub-med/21813565> [Accessed August 23, 2011].
- Manzoni, S. et al.**, 2008. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science*, 321(5889), pp.684–6. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18669860>.
- Marral, E.**, 2002. Everything circulates: Agricultural chemistry and recycling theories in the second half of the nineteenth century. *Environment and History*.
- Matson, P. a et al.**, 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science (New York, N.Y.)*, 277(5325), pp.504–9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20662149>.
- Mazzilli, S.R. et al.**, 2015. Grater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, in press.
- Millenium Ecosystem Assessment**, 2003. *Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment- Summary*. Island Press, Washington, DC.
- Nixon, S. et al.**, 1996. The fate of nitrogen and phosphorus at the land-sea margin of the North Atlantic Ocean. *Biogeochemistry*, 35(1), pp.141–180. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02179826>.
- Pacnik, R. et al.**, 2005. Applications of ecological stoichiometry for sustainable acquisition of ecosystem services. *Oikos*, 109(1), pp.52–62. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.0030-1299.2005.14051.x>.
- Rasse, D.P., Rumpel, C. & Dignac, M.-F.**, 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1–2), pp.341–356. Available at: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11104-004-0907-y> [Accessed December 27, 2010].
- Reeves, D.W.**, 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.*, 43, pp.131–167.
- Reussi Calvo, N.I. et al.**, 2018. Erratum: Predicting Field-Apparent Nitrogen Mineralization from Anaerobically Incubated Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*.
- Schmidt, M.W.I. et al.**, 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), pp.49–56. Available at: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature10386> [Accessed October 5, 2011].
- Silver, W.L.W. & Miya, R.K.R.**, 2001. Global Patterns in Root Decomposition : Comparisons of Climate and Litter Quality Effects. *Oecologia*, 129(3), pp.407–419. Available at: <http://www.springerlink.com/index/V91JGQDVR1RCFXXT.pdf> [Accessed January 30, 2012].
- Thapa, R., Mirsky, S.B. & Tully, K.L.**, 2018. Cover Crops Reduce Nitrate Leaching in Agroecosystems:A Global Meta-Analysis. *Journal of Environment Quality*.
- Unger, P.W. & Vigil, M.F.**, 1998. Cover crop effects on soil water relationships. *Journal of Soil and Water Conservation*. ◀



## Los nutrientes en el ambiente

María Carolina Sasal<sup>1</sup>, Marcelo G. Wilson<sup>1</sup>, Mariela S. Seehaus<sup>1</sup>, Emmanuel A. Gabioud<sup>1</sup>, Natalia V. Van Opstal<sup>1</sup>, Ana Wingeyer<sup>1</sup>, Stella Beghetto<sup>2</sup>, Jezabel Primost<sup>3</sup>, María Liliana Darder<sup>4</sup>, Adrián E. Andriulo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INTA, Estación Experimental Paraná, <sup>2</sup>Cambio Rural

<sup>3</sup>UNLP, Centro de Estudios del Medioambiente, <sup>4</sup>INTA, Estación Experimental Pergamino

sasal.maria@inta.gob.ar

### Introducción

La gestión ambiental o gestión del medio ambiente refiere al conjunto de actividades conducentes al manejo integral del sistema ambiental con el fin de lograr adecuada calidad de vida, previniendo o mitigando los problemas de degradación de recursos naturales que puedan ocurrir en cualquier actividad productiva. La gestión ambiental agropecuaria está cuestionada por buena parte de la sociedad argentina. Percepciones de riesgo de contaminación, degradación de recursos naturales y deterioro de la calidad de los alimentos son algunas de las preocupaciones de la población que es amplificada en redes sociales y medios de comunicación masiva. Al presente, no hay enlace entre estos reclamos de la sociedad y los esfuerzos en modificar o adecuar prácticas para que la producción agropecuaria sea sustentable.

La gestión de nutrientes en el agroecosistema está orientada a satisfacer los requerimientos de los cultivos, preservando los recursos naturales y evitando la contaminación de suelo, aire y aguas (Nobile et al., 2018). El fósforo (P) y el nitrógeno (N) son los nutrientes más utilizados en los agroecosistemas para cubrir la demanda para el crecimiento de plantas y animales (Sharpley et al., 1999; Hart et al., 2004). Si bien los nutrientes aportados al sistema mejoran la productividad de los cultivos, su transporte desde el suelo hacia otros compartimentos ambientales puede generar efectos no deseados tales como eutrofización, pérdida de biodiversidad en ecosistemas acuáticos y la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (Portela et al., 2006; Drinkwater et al., 2017).

A escala global la creciente escasez de agua y competencia por el recurso, la degradación y contaminación de ecosistemas, la pérdida de biodiversidad y el cambio climático, generan presiones adicionales sobre los sistemas de

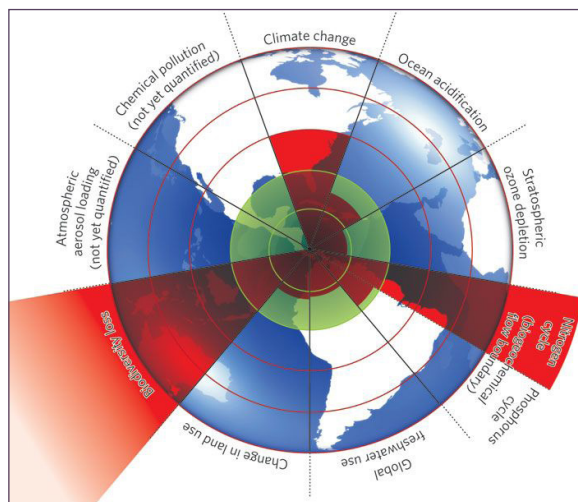
producción (Kassam et al., 2014). Rockstrom et al. (2009) han identificado 9 procesos biofísicos globales y umbrales asociados que si se trasgreden podrían generar un cambio global ambiental inaceptable (Figura 1). En particular, la interferencia en el ciclo del N ya ha superado los límites planetarios propuestos. La variable control que proponen estos autores es la tasa a la que el N<sub>2</sub> se elimina de la atmósfera y se convierte en nitrógeno reactivo para uso humano. Gran parte de este nuevo nitrógeno reactivo termina en el ambiente, contaminando las vías fluviales y la zona costera, acumulándose en los sistemas terrestres y agregando gases a la atmósfera. Respecto de los flujos de P, ya superan los umbrales críticos para muchos estuarios y sistemas de agua dulce. Los autores señalan que cada año se extraen unos 20 millones de toneladas de P y entre 8,5 a 9,5 millones de toneladas encuentran su camino hacia los océanos. Se estima que esto es aproximadamente ocho veces la tasa natural de fondo. Transgredir el límite nitrógeno-fósforo puede erosionar la resiliencia de los ecosistemas marinos, reduciendo potencialmente su capacidad de absorber CO<sub>2</sub> y, por lo tanto, afectando el límite climático.

En Argentina los agroquímicos de mayor volumen de uso son los fertilizantes nitrogenados y fosforados, sin embargo, su utilización no es suficiente para reponer al suelo el N y P exportados en los productos cosechados (Álvarez y Steinbach, 2006). En efecto, este balance negativo de nutrientes constituye uno de los problemas de degradación de suelos más relevantes en el país. En este contexto, cobra relevancia el análisis integral tanto de la dinámica y flujos de agua y de nutrientes en el agrosistema como de la sincronía entre aporte vía fertilización y demanda por parte de los cultivos (Rimski-Korsakov et al., 2009).

Una vía importante de pérdida de nutrientes en agroecosistemas está asociada a las asincronías temporales y/o espaciales entre la oferta y la

demanda del N utilizable por las plantas (Beau-doin et al., 2005); sin embargo, balances neutros o negativos pueden también estar asociados a pérdidas, fundamentalmente asociados a la capacidad de transporte del sistema dependiendo del volumen de agua que fluye de manera superficial y subsuperficial (Sasal et al., 2016; Portela et al., 2017). A una escala espacio temporal de abordaje más amplia, los flujos de agua y nutrientes están determinados por las condiciones climáticas y de uso del suelo.

Para mejorar la eficiencia de uso por parte de los cultivos y reducir las pérdidas de nutrientes hacia aguas superficiales y subterráneas resulta indispensable los estudios y monitoreos de diferentes sistemas, a largo plazo. El estudio de los cambios en la calidad de agua en agrosistemas, los flujos de nutrientes y la definición de medidas de mitigación integralmente viables, requieren la comprensión a diferentes escalas. Sin embargo, en Argentina la producción científica sobre N y P en aguas ha disminuido en los últimos 10 años. De esta manera, la falta de mediciones y monitoreo de nutrientes en cuerpos de agua atenta contra las posibilidades de mejora en la planificación y estimación de riesgos ambientales.



**Figura 1.** Límites planetarios. El sombreado verde interno representa el espacio operativo seguro propuesto para nueve sistemas planetarios. Las cuñas rojas representan una estimación de la posición actual para cada variable. Los límites en tres sistemas (tasa de pérdida de biodiversidad, cambio climático e interferencia humana con el ciclo del nitrógeno) ya han sido excedidos. Tomada de Rockstrom et al. (2009).

El objetivo de este trabajo fue evaluar diferentes prácticas agronómicas como fuente no puntual de contaminación de cuerpos de agua, analizar las pérdidas de N y P provenientes de agrosistemas a diferentes escalas (regional, cuenca, parcela y microparcela) y proponer un manejo integral de suelos para reducir pérdidas de nutrientes.

## Algunas investigaciones realizadas en Entre Ríos

La provincia de Entre Ríos tiene una amplia variedad de ambientes y diversidad de sistemas de producción. Debido a su combinación de clima y relieve, posee una vasta red hidrográfica en todo su espacio territorial (Lenzi et al., 2006). Sus características ambientales (topografía ondulada, baja capacidad de infiltración de sus suelos y precipitaciones intensas en primavera-verano-otoño) predisponen a gran parte de la superficie provincial a procesos de degradación de suelos, especialmente por erosión hídrica (Scotta et al., 1989) y, además, son causas de riesgo de contaminación por escurrimiento a los cursos de agua superficiales. Entre 2012 y 2013 se llevó adelante un relevamiento a escala regional de más de 300 puntos de monitoreo en diversos cursos de agua superficial (ríos, arroyos, tajamares, lagunas) de la provincia y se analizaron concentraciones de N y P (Sasal et al., 2015). Se registró que 67,5% de los sitios presentaba concentraciones de N ( $\text{N-NO}_3^-$ ) mayores al umbral de eutrofización (1,5 ppm) y también más del 82% de los sitios muestreados presentó valores de P ( $\text{P-PO}_4$ ) superiores al umbral de eutrofización (0,075 ppm). A partir de este trabajo se iniciaron distintas líneas de investigación, a diferentes escalas para abordar el estudio de vías de aporte difuso de nutrientes desde agrosistemas hacia aguas: lixiviación y escurrimiento y de evaluación de prácticas de mitigación y desde diferentes escalas de abordaje.

## Escala regional: Nutrientes en el delta del Paraná

Entre Agosto de 2014 y Diciembre de 2016 se realizaron 8 campañas de muestreo en 20 sitios seleccionados en el Delta del río Paraná (Figura 2). El área se extiende a lo largo de aproximadamente 300 km y comprende las jurisdicciones de 5 departamentos: Diamante, Victoria,

Guauguay, Guauguaychú e Islas del Ibicuy, y constituye una compleja planicie de inundación con características biogeográficas y ecológicas únicas en la Argentina. Se recogieron un total de 405 muestras para ser analizadas, de las cuales se obtuvieron un total de 5727 registros de los parámetros de estudio.

Los resultados indican una gran homogeneidad en la composición de las aguas del macrohumedal para los parámetros físico-químicos de calidad de aguas estudiados. Como ejemplo se presenta en la **Figura 3** los resultados de Oxígeno disuelto (OD) agrupados en porciones Alta, Media y desembocaduras de principales ríos y arroyos (Primost 2018).

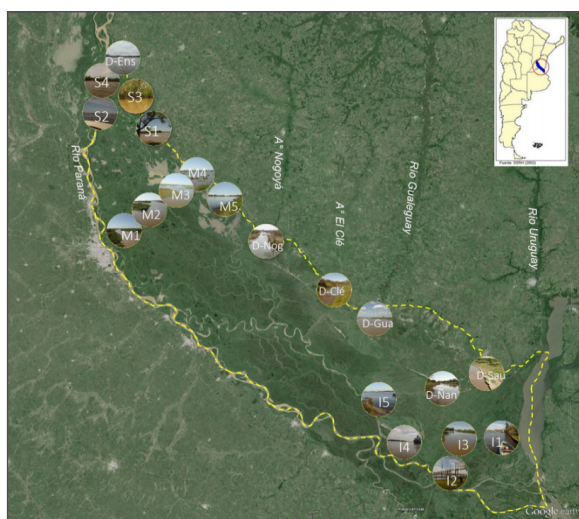


Figura 2. Sitios de estudio en el delta del Paraná

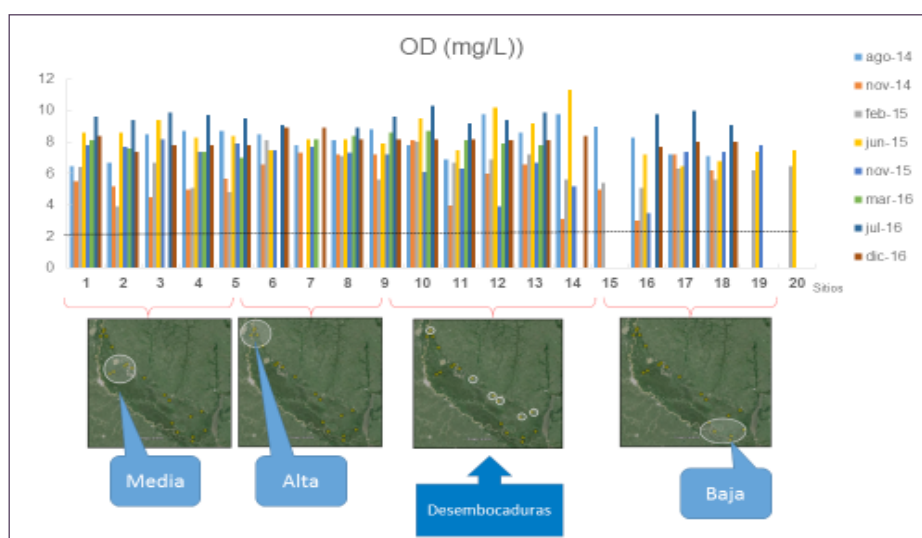


Figura 3. Oxígeno disuelto en 20 sitios y 8 momentos de muestreo en el Delta del Paraná

Sin embargo, todos los tributarios que recorren la provincia y desaguan en el delta presentaron mayores niveles de nutrientes con respecto a los sitios Delta. Los niveles de N ( $\text{N-NO}_2^- + \text{N-NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ ) fueron hasta 5 veces mayores que los sitios del Delta. En cuanto al P (Total y disuelto), los tributarios presentaron niveles entre 2 y 6,5 veces por encima de los del propio Delta. La **Figura 4** muestra como ejemplo del incremento en las desembocaduras, las concentraciones de P total.

Históricamente la carga de nutrientes en los ríos ha ido aumentando de forma paralela al incremento de poblaciones humanas en sus cuencas, como resultado tanto de las aguas residuales provenientes de los aportes humanos como la de animales y la proveniente de las tierras de cultivo. Este trabajo pone en evidencia, por un lado, el servicio ambiental de purificación del agua que presta el delta y la importancia de la conservación de este ambiente. Por otro lado, nos plantea interrogantes acerca de las fuentes de aporte de nutrientes a los afluentes que recorren la matriz productiva de la provincia de Entre Ríos.

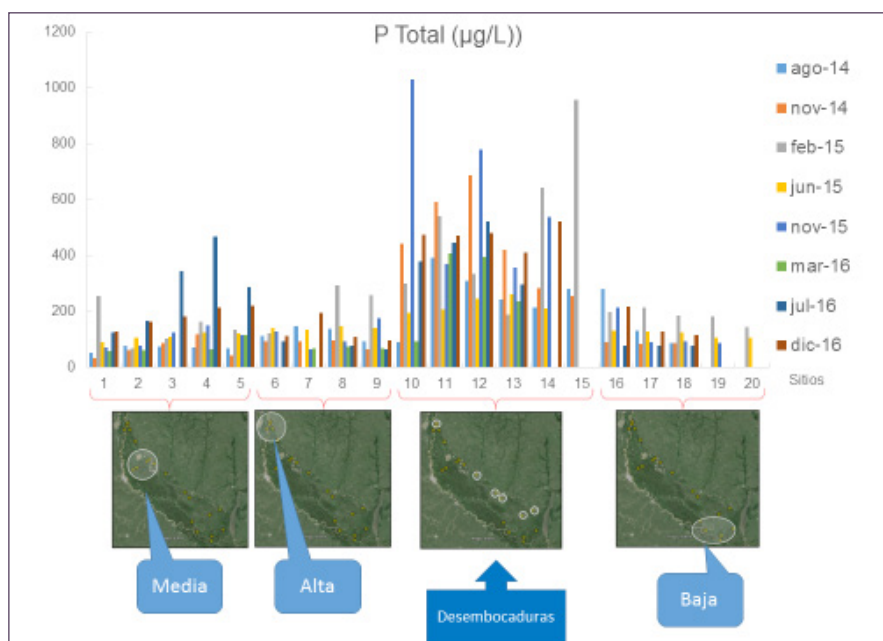
### Escala microcuenca:

En la unidad de monitoreo agroambiental de la EEA Paraná del INTA (**Figura 5**), se analizaron los cambios en la concentración de N y P del agua de un embalse y de una napa freática en una secuencia agrícola maíz-trigo/soja bajo siembra directa a escala de microcuenca (29 ha). La unidad de monitoreo consta de 9 freatímetros en una napa colgante cercana a la superficie y un canal colector que desagua en un embalse. El período de muestreo abarcó entre mayo de 2015 y diciembre de 2017.

En general, las concentraciones de N registradas durante los tres años de estudio tanto en el agua freática como en el agua superficial fueron inferiores al nivel guía para agua de bebida; sin embargo, se detectaron pulsos con niveles que superaron el doble de este umbral de 10 mgN l<sup>-1</sup>. A partir de septiembre y hasta noviembre de 2017, el 50% de los pozos registraron valores superiores al nivel guía (max. 20,4 mg N l<sup>-1</sup>). Estos aumentos en las concentraciones de N del agua freática se atribuyeron a pérdidas de N por lixiviación debidas a una alta dosis de fertilización a la siembra del cultivo de maíz (dosis media: 117 kg ha<sup>-1</sup> el 17/9/2017). Esta fertilización se realizó tres semanas antes del muestreo en un período de sequía con formación de grietas en el perfil de suelo que pudo generar pérdidas vía flujo

preferencial de N con lluvias de bajo volumen. Andriulo et al. (2004) reportaron que, del total de N perdido por drenaje durante el ciclo de un cultivo de maíz, aproximadamente el 80% se produjo entre siembra y cuarta hoja. En el Pozo de referencia (P8), alejado del lote bajo producción agrícola, no hubo picos ni cambios en la concentración de N durante todo el período de estudio y los valores oscilaron entre 0,3 y 2,14 mg N l<sup>-1</sup>. Estas altas concentraciones registradas en la unidad de monitoreo agroambiental, asociadas a la cercanía al momento de fertilización nitrogenada en un período de sequía con formación de grietas en el perfil de suelo indican la importancia del flujo preferencial de N bajo las condiciones edafoclimáticas de la región. Además, plantea la necesidad de revisión de momento y dosis de fertilización utilizados.

Las concentraciones de P en el agua freática fueron inferiores al umbral de agua de bebida y en el agua superficial presentaron valores superiores al nivel guía de eutrofización. En el embalse, las concentraciones de P oscilaron entre 0 y 1,02 mgP l<sup>-1</sup>, superando en algunas fechas los umbrales establecidos para eutrofización de 0,075 mgP l<sup>-1</sup> (Marchetti y Verna, 1992, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2003). No se observó relación entre momentos de fertilización y cambios en la concentración. Sin embargo, se encontró correlación entre la concentración de P



**Figura 4.** Fósforo total en 20 sitios y 8 momentos de muestreo en el Delta del Paraná



y el nivel del embalse ( $r=0,6$ ). Este dato coincide con lo registrado en Sasal et al. (2010) quienes en el mismo sitio relacionaron incrementos de concentraciones de P debido a la pérdida de suelo por erosión hídrica. También, Chagas et al. (1999) y Castiglioni et al., (2006) afirman que las pérdidas se dan mayormente por escurrimiento superficial o por erosión de partículas de suelo con fósforo adsorbido. Debido a que los resultados encontrados indican que hubo pulsos de pérdidas fuera del sistema suelo-planta, cobran importancia aspectos como la revisión del diagnóstico de necesidades del cultivo o el momento o forma de aplicación.

También Darder et al. (2018) en estudios realizados en la cuenca del Arroyo Pergamino determinaron que una parte importante de los nutrientes que ingresan en los cursos de agua superficial, son el resultado de la erosión que ocurre en una cuenca. Para comprender la magnitud de estos procesos calcularon los coeficientes de enriquecimiento (CE) de P y N, obtenidos mediante el cociente entre la concentración de cada uno de estos elementos presentes en el sedimento desprendido y transportado por la acción de la lluvia y su concentración en el espesor 0-5 cm del suelo. En el sector agrícola, los sedimentos se enriquecieron en N y P con respecto al suelo de origen, sin registrarse efectos diferenciales de manejo rotación vs monocultivo ni de la posición en el paisaje (loma, media loma, bajo) siendo en promedio, 2 y 2,7 los CE de N y P, respectivamente. La simulación de precipitaciones tuvo un claro efecto sobre el empobrecimiento de nutrientes del suelo, principalmente del P. Esto

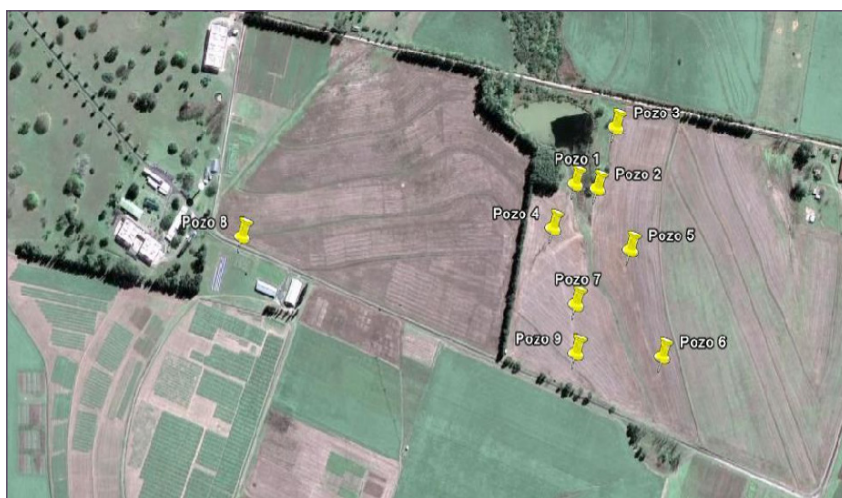
está indicando, que el material erodado es un destino de dichos elementos, contribuyendo de esta manera a su disminución en los distintos ambientes analizados.

### **Escala parcela:**

Desde 1971, la Estación Experimental de INTA Paraná tiene 15 parcelas para la medición de escurrimiento y pérdidas de suelo de acuerdo con la metodología propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de EE.UU. y la FAO. Estas parcelas, ubicadas sobre un Argiudol, son de 100 m<sup>2</sup> y 3,5% de pendiente y permiten el control de los ingresos de agua de las lluvias y la medición de cantidad y calidad de los excedentes hídricos por escurrimiento (Figura 6).



**Figura 6.** Parcelas de escurrimiento de INTA EEA Paraná.



**Figura 5.** Unidad de monitoreo agroambiental de la EEA Paraná. Los puntos indican localización de freáticos

cuencias de cultivos bajo siembra directa (Soja -S-; Soja con cultivo de cobertura CC-S-; Trigo/Soja -T/S-; Maíz-Trigo/Soja -M-T/S-) y se toman como referencia 2 parcelas: pastura natural y suelo laboreado. Datos históricos muestran diferencias muy importantes en cuanto a pérdidas de agua por escurrimiento entre secuencias. Un análisis realizado entre 2006 y 2016 indica que el monocultivo de Soja perdió 5 veces más agua que la rotación Maíz-Trigo/Soja.



Durante el período 2010-2016 se midieron las pérdidas de N y P en el agua de escurrimiento. Para el caso del N ( $\text{mg l}^{-1}$ ), T/S y CC-S presentaron las mayores concentraciones medias anuales diferenciándose de S. Estas concentraciones de N en agua de escurrimiento fueron superiores al nivel guía de eutrofización ( $1,5 \text{ mg l}^{-1}$ ) para T/S y CC-S e inferiores al umbral de agua para bebida ( $10 \text{ mg l}^{-1}$ ). La menor concentración en S podría deberse a la ausencia de fertilización nitrogenada. Sin embargo, no hubo correlación entre las concentraciones de N y la dosis de fertilización.

Las concentraciones de P ( $\text{mg l}^{-1}$ ) en agua de escurrimiento reflejan un comportamiento similar a N, con diferencias entre T/S y CC-S respecto a S. Los valores fueron superiores al umbral de eutrofización ( $0,075 \text{ mg l}^{-1}$ ) e inferiores al umbral para bebida ( $10 \text{ mg l}^{-1}$ ) en todas las secuencias analizadas. Al igual que en el caso del N, tampoco hubo correlación entre las concentraciones de P y la dosis de fertilización. La cantidad de N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) media anual perdida durante el período de estudio presenta los menores valores para la secuencia M-T/S, los mayores para CC-S y valores intermedios para T/S y S continua. En el caso de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) también el menor valor es para M-T/S (sin diferencias significativas respecto de T/S y S monocultivo), con un comportamiento diferente respecto de CC-S (Seehaus et al., 2018).

Si bien las concentraciones de P y N no están asociadas y las diferencias entre secuencias no son de magnitudes importantes, las cantidades perdidas de

N y de P están altamente correlacionadas ( $r=0,89$ ), y cada una de ellas depende del volumen escurrido. El volumen escurrido explica el 58% de la pérdida de N y el 81% de la pérdida de P. Esto resulta altamente relevante: las pérdidas de nutrientes dependen del volumen escurrido. En un contexto de pronóstico climático de aumento en la cantidad e intensidad de las precipitaciones, tener en consideración cómo serán los flujos de nutrientes resulta central.

La campaña que transitamos (2018/2019) se ha caracterizado por frecuentes e intensas precipitaciones en la región. Hemos observado, que las diferencias entre las secuencias agrícolas estudiadas se disipan ante eventos de precipitaciones de muy elevado volumen con condiciones de humedad de suelo cercanas a saturación. Como ejemplo, en enero de 2019, de los 15 días con precipitaciones, se registraron 7 que generaron escorrentía. Como referencia, un año de precipitaciones cercanas a la media histórica ( $\sim 1000 \text{ mm}$  anuales), tiene entre 20 y 30 eventos que generan escurrimiento. Aproximadamente, el 25% del agua caída en enero de 2019 se perdió por escurrimiento y no hubo diferencias entre las secuencias de cultivos analizadas. En comparación, la pastura sólo perdió 1,5 % del agua de lluvia (infiltró el 98,5%) y el suelo descubierto más del 40% del agua precipitada.

Por otro lado, si bien los registros nos indican que no hubo diferencias significativas en captación de agua entre secuencias, se registraron diferencias en cuanto a la cantidad de sedimentos arrastrados: el monocultivo de soja perdió  $1,9 \text{ tn ha}^{-1}$  y la rotación M-T/S  $0,085 \text{ tn ha}^{-1}$ , 22 veces menos.

Hay evidencias que la adopción de secuencias de cultivos u otras prácticas que reduzcan las pérdidas de agua por escurrimiento y la pérdida de suelos por erosión hídrica mejorará la eficiencia del sistema de producción y reducirá los riesgos ambientales asociados. Esta investigación acredita la recomendación de implementar secuencias intensificadas, con maíz y dobles cultivos o cultivos de cobertura para mantener el suelo ocupado la mayor parte del año, con mayor actividad de raíces y captación de agua, y asemejarse al efecto que genera una pastura. La sustentabilidad del sistema de agricultura continua depende directamente del tipo de rotación y/o secuencia de cultivos implementada. Sin embargo, deben responderse aún muchos interrogantes, particularmente asociados a cómo adaptar los sistemas a eventos extraordinarios como el que se registró este enero.

## Con el foco en ciertas prácticas para minimizar pérdidas

El INTA, las universidades y diferentes organismos de ciencia y tecnología están trabajando en estos nuevos desafíos que plantean las previsiones de cambio climático a fin de asegurar la sustentabilidad de las producciones agropecuarias. Hace falta más información, más monitoreo y ensayos de largo plazo que permitan integrar la información.

En los últimos años ha crecido la información sobre los servicios ambientales y productivos que prestan los cultivos de cobertura (CC). Restovich et al. (2017) muestran cambios en la concentración media de N del drenaje durante un ciclo completo de rotación soja-maíz, siendo 6 y 15 mg L<sup>-1</sup> con y sin CC, respectivamente. Los autores indican que los CC reducen entre 50% y 90% el N del suelo en comparación con barbecho químico. Sin embargo, concluyen que "las pérdidas por lixiviación están más vinculadas a la cantidad de agua que pasa por el suelo que al excedente de N calculado como la diferencia entre las entradas (fertilización nitrogenada, fijación biológica de las leguminosas y deposición atmosférica) y lo exportado con la cosecha de grano. Así, balances negativos pueden estar asociados a pérdidas por lixiviación cuando la oferta y la demanda de N no coinciden temporalmente y cuando el N lixiviado proviene de una fuente no controlada como la mineralización de la MO acumulada en el suelo y, en menor medida, del fertilizante nitrogenado residual".

Otras fuentes de N y P que pueden alcanzar los cursos de agua son la utilización de residuos de la cría de animales en confinamiento. Gabioud et al. (2018) evaluaron enmiendas de disponibilidad regional como alternativas de manejo para la mejora de las condiciones estructurales del suelo y evidenciaron una interesante potencialidad en cuanto a su utilización como estrategia a corto plazo para remediar las condiciones estructurales desfavorables de un Argiudol representativo de la zona agrícola de Entre Ríos. Sin embargo, detectaron pulsos de lixiviación de N y de escurrimiento de N y P coincidentes con momentos de fertilización y aplicación de enmiendas orgánicas.

La frontera agrícola ha avanzado en distintas zonas de Argentina. En la provincia de Entre Ríos la zona norte es la que ha experimentado de forma más acentuada este avance vinculado al

aumento del desmonte. Este avance en general se vincula con procesos de degradación de los recursos naturales que incrementan los riesgos ambientales, comprometiendo además la sustentabilidad de los sistemas productivos (Bouza et al., 2016; Wilson, 2007). Los impactos generados sobre la calidad del agua derivan fundamentalmente del aporte difuso de plaguicidas y nutrientes por deriva, escurrimiento o erosión. Se está llevando adelante un estudio en la cuenca del A°Estacas con organismos bioindicadores para evaluar el efecto de contaminantes sobre las comunidades acuáticas (Van Opstal et al., 2018).

Las prácticas identificadas para minimizar pérdidas no son novedosas ni desconocidas para el sector agropecuario. Sasal et al. (2017) en ensayos en microparcels mostraron que lluvias muy próximas a fertilización fosforada favorecen pérdidas de P por escurrimiento. Está demostrado que minimizar el escurrimiento, reduce el aporte de nutrientes desde agroecosistemas hacia ambientes acuáticos. Las prácticas de conservación de suelo, tales como la sistematización de tierras y la siembra directa, permiten controlar la velocidad del escurrimiento del agua de lluvia. Así, constituyen herramientas para minimizar la erosión hídrica y las pérdidas de nutrientes asociadas. En las lomas y media-lomas con agricultura continua, es necesario implementar secuencias intensificadas y en los bajos preservar la vegetación en franjas ribereñas.

## Consideraciones finales

El INTA, las Universidades, las instituciones de ciencia y técnica y algunos organismos de gobierno cuentan con una gran variedad de datos ambientales, información del estado de los recursos naturales y conocimientos específicos, pero carecemos de evaluaciones integradas y puestas en un formato que permita su uso en la toma de decisiones.

En los últimos 10 años, algunos estudios a diferentes escalas identifican altas concentraciones de N y P que llegan a cursos de agua provenientes de los sistemas de producción actuales y permiten analizar cuáles son las prácticas a rever para reducir las pérdidas. Los resultados indican la necesidad de modificar prácticas agropecuarias que minimicen riesgos ambientales y de detectar áreas problema.



## Bibliografía

- Álvarez, R & HS Steinbach. 2006. Balance de carbono en suelos cultivados. En: *Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Universidad de Buenos Aires. 55-68 pp
- Andriulo, A.; S Portela; MC Sasal & F Rimatori, F. 2004. Efecto del tipo de suelo sobre el transporte de solutos en lisímetros. I. Nitratos. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, 22 al 25 de junio.
- Beaudoin, N., J.K. Saad, C. Van Laethem, J.M. Machet, J. Maucorps, B. Mary. 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agric. Ecosys. Environ.* 111:292-310
- Bouza, M.; Aranda-Rickert, A.; Brizuela, M.; Wilson, M.G.; Sasal, M.C.; Sione, S.M.J.; Beghetto, S.; Gabioud, E.; Oszust, J.; Bran, D.; Velazco, V.; Gaitan, J.; Silenzi, J.; Echeverría, N.; De Lucia, M.; Iurman, D.; Vanzolini, J.; Castoldi, F.; Hormaeche, J.; Johnson, T.; Meyer, S. y Nkonya E. 2016. Economics of Land Degradation in Argentina. In *Economic of land degradation and improvement – A global assessment for sustainable development* (E. Nkonya, A. Mirzabaev and J. von Braun, eds). Springer Open. 291-326. Castiglioni, MG; CI Chagas; MJ Massobrio; OJ Santanatoglia & A Buján. 2006. Análisis de los escurrimientos de una microcuenca de Pampa Ondulada bajo diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del suelo*, 24(2), 169-176.
- Chagas, CI; RS Lavado; CA Revila & GJ Macias. 1999. Movimiento superficial de fósforo en la pampa ondulada. *Ciencia del Suelo*, 17 (2) 46-53.
- Darder, M. Liliana; Castiglioni, Mario G.; Sasal, M. Carolina y Andriulo, Adrián E. 2018. Enriquecimiento de Nitrógeno, Fósforo y Carbono en los sedimentos generados en una cuenca de la Pampa ondulada. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelo: Legado social de edición limitada". San Miguel de Tucumán 15 al 18 de mayo de 2018.
- Drinkwater L.E, Schipanski M., Snapp S., Jackson L.E. 2017. *Ecologically Based Nutrient Management in Agricultural Systems (Second Edition)*, Agroecology and Rural Innovation for Development. p.203-257. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802070-8.00007-4>
- Hart, MR; BF Quin & ML Nguyen. 2004. Phosphorus Runoff from Agricultural Land and Direct Fertilizer Effects. *J. Environ. Qual.* 33:1954-1972.
- Gabioud, E.A.; Wilson, M.G.; Sasal, M.C.; Chagas, C.I.; Van Opstal, N.V.; Barón, H.J. 2018. Efecto de aplicaciones de cama de pollo y yeso sobre la infiltración en Argiudoles bajo siembra directa. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelo: Legado social de edición limitada". San Miguel de Tucumán 15 al 18 de mayo.
- Kassam, A., R. Derpsch, T. Friedrich. 2014. Global achievements in soil and water conservation: The case of Conservation Agriculture. *International Soil and Water Conservation Research*. 2: 5-13. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30009-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30009-5)
- Lenzi L.M., Duarte O.C. y E.L. Díaz. 2006. Recursos hídricos superficiales. El Arroz, su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos. Benavidez RA (ed). Tomo 1. Ediciones UNL y EDUNER, Entre Ríos.
- Marchetti, R & N Verna. 1992. Quantification of the phosphorus and nitrogen loads in the minor rivers of the Emilia-Romagna coast (Italy): A methodological study on the use of theoretical coefficients in calculating the loads. Intern. Confer. on Marine Coastal Eutrophication. *Sci. Total Environ. Suppl.*: 315-336.
- Portela, S; A. Andriulo; M. C. Sasal; B. Mary and E Jobbágy. 2006. Fertilizer vs. organic matter contribution to nitrogen leaching in cropping systems of the pampas: 15N applications in field lysimeters. *Plant Soil* 289:265-277
- Portela S., Restovich S., González H., Torti J. 2017. Reducción del drenaje profundo y la lixiviación de nitrógeno en rotaciones agrícolas con cultivos de cobertura. *Ecología Austral* 26:212-220
- Rimski-Korsakov H, Rubio G, Lavado RS. 2009. Effect of Water Stress in Maize Crop Production and Nitrogen Fertilizer Fate. *Journal of Plant Nutrition* 32: 565-578.
- Rockstrom, J., W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sorlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, and J. Foley. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecol. Soc.* 14: 32. <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>.
- Sasal, MC, Andriulo, AE, Wilson, MG, Portela, SI. 2010. Pérdidas de glifosato por drenaje y escurrimiento en molisoles bajo siembra directa. *Información tecnológica* Vol. 21: 135-142.
- Sasal, MC; I Demonte; A. Cislighi; EA Gabioud; JD Oszust; MG Wilson; N Michlig; HR Beldomenico & MR Repetti. 2015. Glyphosate loss by runoff and its relationship with phosphorous fertilization. *J. Agric. Food Chem.* 63: 4444-4448
- Sasal, MC; H Boizard; A. Andriulo; M Wilson & J Léonard. 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil & Tillage Research*. 173: 33 - 41.
- Scotta, E.S.; Nani, L.A.; Conde, A.A.; Rojas, A.C.; Castañeira, H.; O.F. Paparotti. 1989. Manual de sistematización de Tierras para control de erosión hídrica y aguas superficiales excedentes (Segunda edición corregida y aumentada). INTA EEA Paraná. Serie Didáctica N° 17. 56 p.
- Seehaus, M.; Gabioud, E.A.; Van Opstal, N.V.; Oszust, J.D.; Wilson, M.G.; Beghetto, S.M. y Sasal, M.C. 2018. Escurrimiento superficial y pérdidas de fósforo y nitrógeno asociadas a secuencias de cultivos en siembra directa. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelo: Legado social de edición limitada". San Miguel de Tucumán 15 al 18 de mayo de 2018.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. 2003. Niveles Guía Nacionales de Calidad de Agua Ambiente. 24p
- Van Opstal, N.V.; Seehaus, M.; Gabioud, E.; Oszust, J.D.; Wilson, M. y Sasal, M.C. 2018. Nitrógeno y fósforo en agua superficial y subterránea en secuencia maíz-trigo-soja a escala de microcuenca. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. "Suelo: Legado social de edición limitada". San Miguel de Tucumán 15 al 18 de mayo de 2018.
- Wilson, M.G. 2007. Usos de la tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña, España. 227 p. y 1 anexo de 48 p. ◀



# Toma de decisiones en nutrición de cultivos integrada al ambiente edáfico, clima y manejo

Gustavo N. Ferraris

Manejo de cultivos INTA, EEA Pergamino.  
Av Pte. Dr. Frondizi km 4,5 (B2700WAA) Pergamino  
ferraris@gustavo.inta.gob.ar

Durante muchos años, la respuesta a la fertilización ha sido abordada como un factor individual, intentando aislar el resto de las variables de la respuesta del cultivo. Se buscaba posicionar el resto de los factores en el óptimo, de manera que no limitaran la expresión del nutriente o elemento objeto de estudio. Una aproximación más cercana introdujo el concepto de manejo sitio-específico. Bajo este paradigma, se empezó a considerar la interacción con el agua, la textura o la altimetría como factores fundamentales que interactúan y modifican la respuesta a la fertilización. El caso más representativo es el del nitrógeno (N), cuya interacción con el estado hídrico es ampliamente conocida. La decisión de manejo de N "por ambientes" en cultivos de verano implica fertilizar con dosis más elevadas los sitios con mejor disponibilidad hídrica, a excepción que la presencia de napa cercana a la superficie o un relieve excesivamente plano acerque la posibilidad de sufrir anegamientos. En cultivos de invierno, con frecuencia la limitación nutricional es superior a la hídrica, determinando mayor eficiencia de uso de los nutrientes en ambientes de baja fertilidad, aun cuando su rendimiento sea inferior a los ambientes superiores.

Una mirada actual podría considerar al ambiente como un concepto móvil y dinámico, que excede a los factores hídricos y de suelo. De este modo, la fecha de siembra – especialmente en maíz, pero también considerando la fertilización fosforada en soja-, la densidad y aun la genética podrían determinar diferentes curvas de respuesta y requerimientos de fertilización. Este enfoque de un sistema dinámico en permanente evaluación y con requerimientos de ajuste permanente durante el ciclo podría ser aplicado a otros elementos diferentes de N, especialmente aquellos de alta movilidad como azufre (S).

## Trigo

En la Región Pampeana Argentina, el trigo es el cultivo de invierno que ocupa la mayor su-

perficie con 6,37 millones de ha y 18,7 millones de toneladas producidas durante la campaña 2017/18 (Fuente: Bolsa de Comercio de Rosario). El cultivo ha presentado un notable avance en genética, acompañado por un intensivo uso de tecnología, destacando entre los principales a la fertilización. Nitrógeno y fósforo (P) continúan siendo los principales elementos limitantes, no obstante, la detección de carencias de meso y micronutrientes como S o zinc (Zn). En la Región Pampeana existe abundante información para la elección de cultivares de trigo según se priorice rendimiento, calidad o sanidad. Esta información es generada a través de una red oficial sistematizada por INASE (ROET, 2019), bien complementada por un importante número de experimentos regionales. **Sin embargo, poco se conoce de la interacción entre genética y nivel tecnológico.** Battenfield et al. (2018) demostraron que existe respuesta diferencial a la fertilización según genotipo. Esto fue señalado en la región Norte de Buenos Aires por Ferraris y Arias Usanivaras (2018). La fertilización fosforada a su vez interactúa con la respuesta a N. La deficiencia de P reduce la eficiencia de uso de N. Al afectar la absorción total del nutriente, podría reducir el rendimiento, pero también la concentración de proteína en grano (Ferraris et al., 2017).

Durante el ciclo 2018, se condujo en la EEA INTA Pergamino un experimento de campo donde se evaluó la respuesta de cultivares de trigo y cebada a niveles crecientes y secuenciales de fertilización. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar con 2 repeticiones, tratamientos en arreglo factorial completo de dos variables: Fertilización (4 niveles) y Genotipo (10 niveles) resultando el diseño en 40 tratamientos. Las fuentes utilizadas fueron superfosfato triple de calcio (SPT) (0-20-0), Urea granulada (UG) (46-0-0) y Basfoliar Top N (BFTN) (27-11-16,  $\delta$  1,25). Todos los tratamientos recibieron 20 kg S ha<sup>-1</sup> como Sulfato de Calcio (Tabla 1). Este diseño permite identificar claramente la interacción entre genética y fertilización.

**Tabla 1.** Cultivares y tratamientos de fertilización evaluados en el experimento. (s): aplicación de fertilizante a la siembra. (m): aplicación de fertilizante en macollaje. (hb): aplicación de fertilizante en hoja bandera.

Cultivares	Fertilización
DM Algarrobo	T1: SPT 100 kg ha <sup>-1</sup> (s)
Bioceres	UG 120 kg ha <sup>-1</sup> (s)
Basilio	T2: SPT 100 kg ha <sup>-1</sup> (s)
Baguette 680	UG 120 kg ha <sup>-1</sup> (s)
SY 120	UG 120 kg ha <sup>-1</sup> (m)
ACA 602	T3: SPT 100 kg ha <sup>-1</sup> (s)
ACA 909	UG 120 kg ha <sup>-1</sup> (s)
DM Ñandubay	BFTN 28 l ha <sup>-1</sup> (hb)
DM Ceibo	T4: SPT 200 kg ha <sup>-1</sup> (s)
Klein Minerva	UG 120 kg ha <sup>-1</sup> (s)
Andreia	UG 120 kg ha <sup>-1</sup> (m)
	BFTN 28 l ha <sup>-1</sup> (hb)

En las **Tablas 2 y 3** se presentan los rendimientos y concentración de proteína de las diferentes combinaciones cultivar – fertilización. Las variedades Andreia, DM Ceibo, Buck Cambá, SY 120, DM Ñandubay y DM Algarrobo compartieron el grupo de mayor rendimiento, seguidos de cerca en un segundo grupo por ACA 602. Los valores de concentración de proteína fueron satisfactorios en todos los cultivares. En orden de jerarquía,

se destacaron ACA 602 y Klein Minerva (13,4%) alcanzando la concentración superior, luego Buck Cambá (12,7 %), SY 120 (12,5 %), Bioceres Basilio (12,5 %), Baguette 680 (12,4 %) y DM Ñandubay (12,4 %). El coeficiente de variación de la concentración de proteína fue superior en T1 (7,6 %). Esto significa que, ante escasa fertilización, el efecto varietal sobre la proteína se acentúa (**Tabla 3**). La variedad de cebada Andreia registró la proteína mínima, y la sensibilidad (CV) máxima frente a cambios en la fertilización (**Tabla 3**). Aquellas variedades con menor CV serían más estables ante escasa fertilización nitrogenada o altos niveles de dilución. La variabilidad de respuesta a la fertilización entre genotipos fue reportada anteriormente por Ferraris y Arias Usandivaras (2018). Wang et al. (2018) mencionan asimismo interacción entre fertilización nitrogenada y eficiencia de uso de agua, y variabilidad genética para ambos factores.

En promedio de todos los cultivares, cada mejora en la fertilización significó un salto significativo en los rendimientos. El rendimiento medio del tratamiento base estuvo muy por debajo del potencial de la genética y el sitio (**Tabla 2**). Fue muy destacado el incremento para el tratamiento T2, que consideró refertilización con N60, incrementando la productividad en 1066 kg ha<sup>-1</sup> de rendimiento (**Tabla 2**) y 0,6 % de proteína (**Tabla 3**). Esto significa una eficiencia de 17,7 kg grano kg N<sup>-1</sup>. La aplicación tardía de N (T3) impactó en rendimiento subiéndolo en 455 kg

**Tabla 2.** Rendimiento de cultivares de trigo/cebada según tratamiento de fertilización. Pergamino, campaña 2018/19.

	Rendimientos (kg ha <sup>-1</sup> )				Promedio Variedad
	T1	T2	T3	T4	
DM Algarrobo	4087	4721	4260	5736	4701 abc
Bioceres Basilio	3183	3798	3519	6250	4187 cd
Baguette 680	2370	3620	3264	5231	3621 d
SY 120	3957	5135	4606	6058	4939 ab
ACA 602	4154	5163	4144	5106	4642 bc
ACA 909	3615	4404	3779	4846	4161 cd
DM Ñandubay	4135	5159	4389	6048	4933 ab
DM Ceibo	4351	5399	5048	5649	5112 ab
Klein Minerva	3250	3851	4034	4875	4002 cd
Andreia	4466	5317	5034	6827	5411 a
Buck Cambá	3692	6423	4192	5488	4949 ab
Promedio fertilizante	3751 d	4817 b	4206 c	5647 a	

ha<sup>-1</sup> y 0,3 % en proteína (**Tabla 3**). Finalmente, el tratamiento completo (T4) evidencia una fuerte interacción positiva N\*P sobre rendimiento y calidad. El diferencial sobre T1 alcanzó a 1896 kg ha<sup>-1</sup> y 0,5% de proteína. Se sugiere que no sólo el N, sino principalmente también el P originaría este comportamiento. Duplicar la aplicación de P habría incrementado la eficiencia agronómica de uso de N (EaUN), determinada a través del incremento de rendimiento por unidad adicional de N aplicado. Esto fue mencionado por Ferraris et al. (2017), sobre un experimento de larga duración consistente en diferentes aplicaciones de P prolongadas a través del tiempo.

Las variedades podrían ordenarse de acuerdo a su tendencia a privilegiar rendimiento o la acumulación de proteína. El primer grupo lo representa en su máxima expresión la cebada y variedades como DM Ceibo, mientras que el comportamiento opuesto correspondería a Klein Minerva y, en menor medida, Baguette 680, ACA 909 o Bioceres Basilio (**Figura 1**). Por su parte, ACA 602, Buck Cambá, SY 120 y DM Ñandubay presentaron un comportamiento equilibrado, propio de las variedades con alta sensibilidad a manejo de la fertilización en rendimiento y calidad.

Respecto de las estrategias de nutrición, un incremento en la dosis de N (T2 – T1, T3 – T1) resultó en mejoras de rendimiento y calidad, en

una magnitud variable según la dosis aplicada (**Figura 2**). En cambio, T4 originó un incremento significativo en rendimiento sosteniendo calidad, demostrando interacción positiva N\*P y un fuerte efecto P sobre rendimiento.

La concentración de proteína respondió a la relación Nd/ton rendimiento, ajustando a una función cuadrática – plateau (**Figura 3**). De acuerdo con la ecuación ajustada, si esta relación toma un valor igual o superior a 37, la concentración de proteína alcanzó un 13%. En cambio, si la relación alcanzó un valor inferior a 37, la proteína disminuyó en forma cuadrática pero siempre en valores satisfactorios (**Figura 3**). Ciertas variedades muestran una mayor partición a proteína y se posicionan sobre la curva de tendencia, i.e ACA 602, Klein Minerva. Otras presentan tendencia a la dilución, siempre por debajo de la función general, i.e Cebada Andreia, DM Ceibo. Finalmente, otras se alinean con buen ajuste a la curva de dilución siendo las más sensibles a manejo, como SY 120, DM Algarrobo, Buck Cambá o DM Ñandubay (**Figura 3**).

Concluyendo, se demuestra que los sistemas actuales se encuentran limitados en NP, mostrando una considerable respuesta al incremento de dosis, pero posiblemente también al momento de aplicación. Un correcto ajuste de dosis de NP,

**Tabla 3.** Concentración de proteína en grano de diferentes cultivares según tratamientos de fertilización. Pergamino, campaña 2018/19.

	Proteína (%)				Promedio Variedad	CV (%)
	T1	T2	T3	T4		
DM Algarrobo	11,4	12,7	11,8	11,8	11,9	4,3
Bioceres Basilio	12,1	12,9	12,4	12,7	12,5	3,0
Baguette 680	12,0	12,8	12,4	12,3	12,4	2,6
SY 120	12,4	12,8	12,1	12,8	12,5	2,7
ACA 602	12,9	13,4	13,6	13,7	13,4	2,7
ACA 909	11,8	12,3	12,4	12,7	12,3	3,3
DM Ñandubay	12,0	12,4	12,5	12,6	12,4	2,0
DM Ceibo	10,7	11,3	10,9	11,3	11,0	2,6
Klein Minerva	13,6	14,1	13,0	13,1	13,4	3,7
Andreia	10,4	11,8	11,0	11,1	11,1	5,2
Buck Cambá	12,4	12,0	13,2	13,0	12,7	4,3
Promedio fert	12,0	12,6	12,3	12,5		
CV (%)	7,6	6,1	6,8	6,3		

aplicado de manera secuenciada durante ciclo, pareciera la estrategia recomendable para balancear rendimiento y calidad. La concentración de proteína ajusta a una función de dilución, permitiendo construir un modelo general. Por su parte, los cultivares evidenciaron cambios en los niveles de partición, priorizando rendimiento o calidad, y diferentes grados de ajuste a la función de dilución general. El experimento demuestra que es posible elegir variedades con buen comportamiento en rendimiento y concentración de proteína, pero estas son las más sensibles a un manejo ajustado.

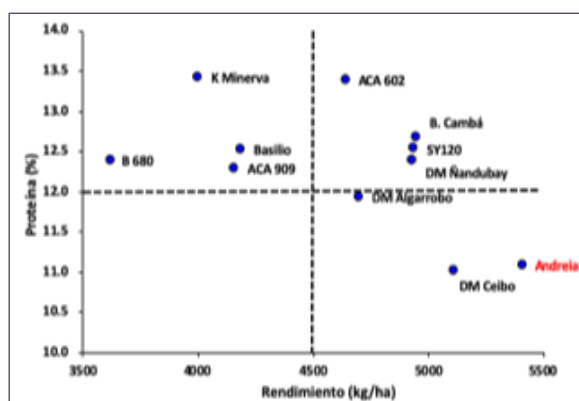


Figura 1. Relación entre concentración de proteína (%) y rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) para cada uno de los cultivares evaluados, promedio de 4 tratamientos de fertilización. EEA INTA Pergamino, año 2018/19.

## Maíz

El maíz es un cultivo con gran potencial productivo y con alta exigencia de factores de producción. Esta sensibilidad a la oferta de recursos determina una considerable brecha de rendimiento entre los actuales y alcanzables a campo. El concepto de brecha de rendimiento ha sido descrito por Fischer (2015). Se estima que esta brecha entre los rendimientos actuales y los alcanzables a campo, con la tecnología hoy disponible, alcanza en la región núcleo pampeana un rango entre 4 y 5 t ha<sup>-1</sup> (Monzón, 2015), la

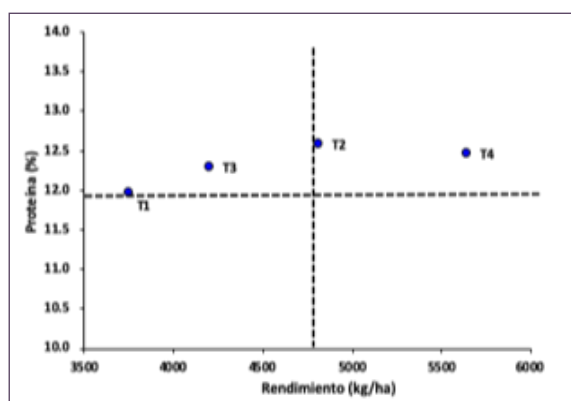


Figura 2. Relación entre concentración de proteína (%) y rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) según tratamientos de nutrición, promedio de diez cultivares de trigo y uno de cebada cervecera. EEA INTA Pergamino, año 2018/19.

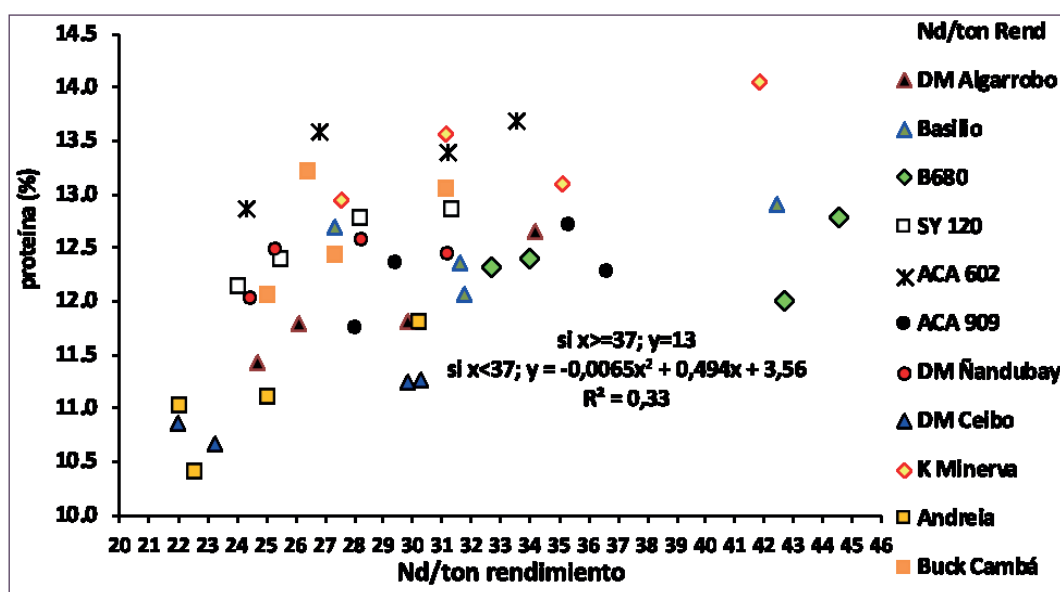


Figura 3. Relación entre concentración de proteína (%) y Nitrógeno disponible por tonelada de rendimiento cosechado (Nd ton<sup>-1</sup>), promedio de 4 tratamientos de fertilización. Cada punto es promedio de dos repeticiones. EEA Pergamino, año 2018/19.



cual podría ser superior a la observada en otras regiones del mundo (Sadras et al., 2015; Guilpart et al., 2017). Los rendimientos actuales expresan una considerable tasa de ganancia (Fischer, 2015), que en Argentina está relacionada con la intensificación tecnológica y se ve favorecida por escenarios de buenas precipitaciones (Aramburu Merlos et al., 2015). Sin embargo, esta tasa debería ser incrementada para alcanzar los niveles deseados de producción de alimentos. Como alternativa para cerrar estas brechas de rendimiento, se ha propuesto una mejora conjunta e interdisciplinaria de los sistemas de producción, más que el ajuste de prácticas individuales de cultivo (Guilpart et al., 2017). En Argentina, buena parte de las brechas de rendimiento se explican a causa de deficiencias nutricionales, como consecuencia de una agricultura tradicionalmente extractiva.

Durante las campañas agrícolas 2015-16, 2016-17 y 2017-18, se realizaron experimentos de campo destinados a cuantificar el efecto de la fertilización nitrogenada, fertilización con zinc, densidad con alto y bajo nivel de insumos y el control de enfermedades foliares sobre el rendimiento de maíz, así como la brecha total de productividad entre un sistema básico y uno optimizado. Todos los tratamientos recibieron fertilización fosforada sin restricciones (P) y una dosis básica consistente en 55 kg N ha<sup>-1</sup> a la siembra (N) (Tabla 4). Los ensayos se realizaron en fecha

de siembra temprana, tardía y de segunda, con un diseño en bloques completos al azar con tres repeticiones.

Los niveles de los factores evaluados se presentan en la **Tabla 4**. Los niveles de los factores fueron **densidad**: 60 mil y 80 mil plantas ha<sup>-1</sup>; **fertilización de base**: superfosfato triple de calcio 100 kg ha<sup>-1</sup> y urea 120 kg ha<sup>-1</sup>; **fertilización en V6**: urea 150 kg ha<sup>-1</sup>; **fungicida**: azoxistrobina (20%) + cyproconazole (8%) 500 ml ha<sup>-1</sup>; **micronutrientes**: (Zn foliar 500 g ha<sup>-1</sup>). Se evaluó un esquema aditivo, agregando tecnologías (T2, T3, T4, T5) sobre un tratamiento base (T1), y sustitutivo, restando tecnologías (T6, T7, T8, T9) respecto de uno completo (T10). Se calculó la contribución de cada tecnología como un promedio de la diferencia de rendimiento en baja producción  $(T_n - T1)/T1 \times 100$  y en alta producción  $(T10 - T_n)/T_n \times 100$ . El efecto densidad se calculó con un mínimo de insumos, baja tecnología,  $(T6 - T1)/T1$  y un aporte completo el alta tecnología  $(T10 - T5)/T5$ . La brecha de rendimiento se calculó entre el tratamiento completo y el base  $(T10 - T1)/T1$ .

Aunque todos los factores de producción evaluados presentaron un efecto positivo, ninguno tomado individualmente mostró un efecto determinante. La brecha global de rendimiento fue superior en los maíces de segunda, luego de una gramínea invernal. Este resultado se explica en carencias nutricionales, especialmente de N (Fi-

**Tabla 4.** Experimento de brechas de rendimiento en maíz. Factores de producción involucrados.

	Densidad	Fertilización base	Fertilización V6	Fungicida	Micronutrientes
Baja					
T1	60000	PN			
T2	60000	PN	N		
T3	60000	PN		Si	
T4	60000	PN			Si
T5	60000	PN	N	Si	Si
Alta					
T10	80000	PN	N	Si	Si
T9	80000	PN	N	Si	
T8	80000	PN	N		Si
T7	80000	PN		Si	Si
T6	80000	PN			

gura 4), cuyo aporte por refertilización incrementó la productividad media en un 20%. Sin embargo, la brecha global de rendimiento alcanzó un 35%, evidenciando la importancia de un abordaje sistémico para incrementar los rendimientos, así como la también la necesidad de sumar factores de producción con este objetivo, lo cual resultaría de mayor impacto en comparación con incrementar excesivamente los niveles de un solo factor. En cultivos de siembra temprana, la brecha global fue de un 30%, aportando la refertilización con N incrementos en un rango de 10% a 15%, la duplicación en dosis de P un 5% a 7%, y el uso de S más Zn 7,7%. En los recuadros negros de la **Figura 4** se señala el sistema en el cual una determinada tecnología expresa mayor impacto. Claramente, las limitaciones nutricionales tienen mayor importancia en sistemas de siembra temprana o de segunda. Aun en un mismo sitio, la prolongación del barbecho y las mayores temperaturas que acompañan las siembras tardías favorecen el aporte de nutrientes desde el suelo determinando una base superior de rendimientos en aquellos tratamientos con escasa fertilización.

Los resultados de la presente red experimental resaltan la necesidad de un abordaje sistémico con el fin de incrementar los rendimientos a nivel de toda la región. La mejora de prácticas aisladas tuvo en cambio un impacto moderado y soslaya las interacciones entre variables. Aun variables consideradas relevantes, como el cambio en la densidad o la fertilización nitrogenada, se diluyen cuando se promedian los efectos de varios sitios. Por otra parte, la determinación de los niveles en que diferentes variables optimizan la productividad es de suma importancia con una proyección y planificación a futuro, ya que el máximo productivo de hoy suele ser el óptimo económico en un futuro cercano.

Asimismo, en la **Figura 5** se presenta la interacción entre localidad, fecha de siembra, densidad y respuesta a la fertilización nitrogenada. En Pergamino, ambiente de buen rendimiento medio, la respuesta fue superior en la fecha de siembra temprana, por su menor contenido de N inicial en el suelo. El incremento en la densidad determinó un mayor rendimiento y competencia inter-planta, ajustando a una función de mayor pendiente (**Figura 5**). Por el contrario, en la localidad de Ramallo, un sitio de menor productividad

Ensayo Brechas x tecnologías 2015/16 - 2017/18				
Factores	Temprano	Tardío	Segunda	
Genética	15,5 %	10 %	8 %	Genética: R. Máx vs R. Medio
Doble P	5-7 %	0-2 %	0-2 %	P: P 20 (s) vs P40 (s)
Refertiliz N	10-15	5-7 %	20 %	N: 60 (s) vs 60 (s) + 60 (V6)
SANIDAD	6,3 %	8,0 %	6,2 %	Densidad: 60 vs 80 mil plantas
DENS (óptimo)	8,0 %	3,8 %	1,2 %	Sanidad y S + Zn: Con vs Sin
DENS (mínimo)	9,3 %	2,5 %	-1,8 %	El rendimiento alcanzable al poco tiempo es el óptimo
Azufre + Zinc	7,7 %	3,5 %	7,6 %	
BRECHA TOTAL	30 %	20 %	35 %	

Figura 4. Brecha global de rendimiento según sistema productivo en maíz, y contribución relativa de diferentes factores de producción. Maíz en siembra temprana, tardía y de segunda, campañas 2015/16, 2016/17 y 2017/18.

y mayor adaptación a siembras tardías, la mayor EUN y respuesta a la fertilización correspondió a este sistema de siembras diferidas. Esto evidencia la prevalencia de la productividad del sitio –demanda– por sobre el contenido de N en el suelo – oferta– entre los factores que explican la respuesta a N. Como sucediera en Pergamino, altas densidades se asociaron a elevada respuesta a la fertilización. Este comportamiento fue propio de un cultivar con alta eficiencia de uso del N externo y elevada respuesta a la fertilización – genotipo “sensible”-. Otros cultivares de comportamiento más estable mostraron curvas de respuesta más aplanadas y saturación a dosis inferiores.

## Soja

Los rendimientos de soja dependen del germoplasma de la variedad, el manejo y el am-

biente en el que se desarrolla el cultivo (Ferraris et al., 2014; Ferraris y Díaz Zorita, 2015; Ferraris y Mousegne, 2016). Este último se caracteriza por aspectos propios del sitio y sólo modificables en el largo plazo (suelo) y otros factores que manifiestan una variabilidad interanual (clima). El manejo forma parte del ambiente, siendo los factores más determinantes el grupo de maduración (GM) y la fecha de siembra (FS).

Tradicionalmente se ha asociado la respuesta a la fertilización en soja con variables de suelo como el nivel de fósforo (P) disponible, el contenido de materia orgánica y azufre (S) extractable (Ferraris et al., 2016), o de planta como la concentración absoluta, relativa o curvas de dilución de nutrientes en biomasa (Divito et al., 2016). No obstante, en igual condición de fertilidad, el cultivo podría expresar una respuesta diferencial según diferentes aspectos de manejo que

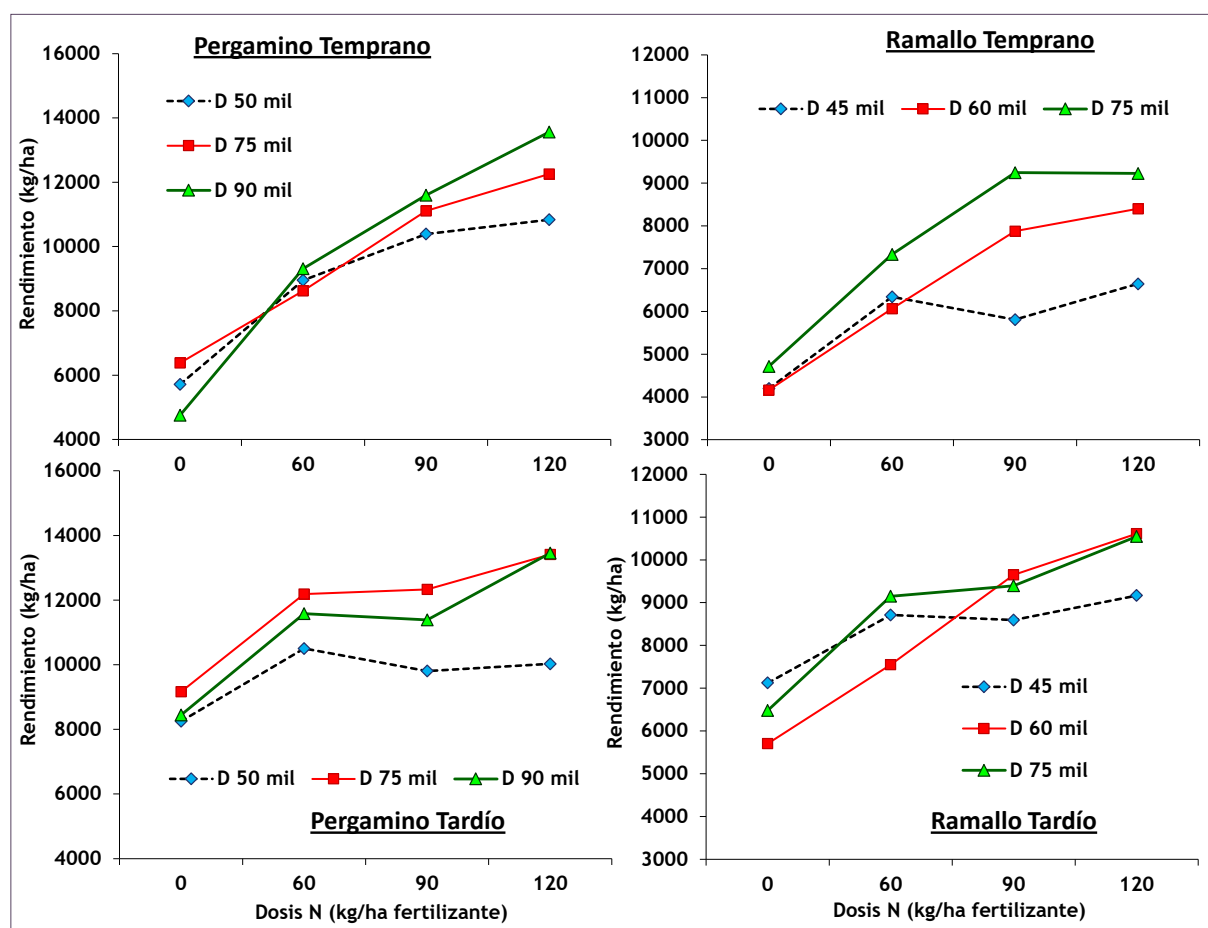


Figura 5. Relación entre rendimiento y dosis de nitrógeno agregado como fertilizante ( $\text{kg N ha}^{-1}$ ) para diferentes densidades de plantas logradas. Localidades de Pergamino (izquierda) y Ramallo (derecha), en siembras tempranas (arriba) y tardías (debajo). Campaña húmeda 2016/17, en un cultivar de alta respuesta media a la fertilización.

modulan la oferta de radiación, temperatura y agua durante el período crítico, la acumulación de biomasa y el índice de cosecha. Este abordaje integral de la práctica, considerando la fertilización como una herramienta más para no limitar la productividad del cultivo fue utilizado en reiteradas ocasiones en otros países relevantes para la producción de soja, como EE.UU. (Orlowski et al., 2016, Edreira et al., 2017, Adams et al., 2018) o Brasil (Moreira et al., 2017; Battisti et al., 2018a y b). La interacción entre cultivar, fecha de siembra y fertilización podría afectar no sólo los rendimientos, sino también la calidad de los granos cosechados (Junior et al., 2017; Suman et al., 2018).

En un trabajo conducido en la EEA INTA Pergamino durante las campañas 2016/17 (húmeda) y 2017/18 (muy seca) se analizó la variabilidad de la respuesta a la fertilización completa, con PS y micronutrientes según el año climático, GM y FS (Tabla 5). Se postula que la respuesta a la fertilización es afectada por variables de suelo (Singh et al., 2018) pero también de cultivo (Ferraris y Moussegne, 2016; Rotundo y Borrás, 2013), limitando la posibilidad de establecer recomendaciones generales. Se propone realizar recomendaciones de fertilización sitio-específicas, integrando aspectos como reserva hídrica inicial, pronóstico climático, FS y GM. Una adecuación en las condiciones de manejo significa, para un mismo nivel de fertilidad, una mejora en la expectativa de respuesta positiva al agregado de nutrientes.

Así como en las precipitaciones, se observó un claro contraste en la tendencia de rendimientos entre campañas (Figuras 6 y 7). En 2016/17 los rendimientos alcanzaron a 4376 y 4836 kg ha<sup>-1</sup> para siembra temprana y tardía, mientras que

en 2017/18 fueron de menor envergadura a consecuencia de la sequía, llegando a 4811 y 3055 kg ha<sup>-1</sup> para igual distribución de FS, respectivamente.

Analizando las combinaciones de tratamientos, se verifica que aun cuando la fertilidad química del sitio es uniforme, la respuesta al agregado de PS + ZnB es muy diferente según combinación de FS y GM. En 2016/17, el rango de rendimientos entre mínimo y máximo alcanzó a 2017 kg ha<sup>-1</sup>, dando gran importancia a las combinaciones de manejo. Los rendimientos superiores de la fecha tardía se explicarían por una escasez incipiente de precipitaciones hasta finales de diciembre. La variedad de longitudes de ciclo, con algunos de ellos muy cortos, permitiría explorar ambientes de alto potencial de rendimiento aun en siembras de diciembre. La respuesta a la fertilización puede variar desde 0 a 1222 kg ha<sup>-1</sup>. En promedio de otros factores, se determinó mayor respuesta en FS temprana - 810 vs 275 kg ha<sup>-1</sup>-. Sólo el GM Vc evidenció escasa respuesta. En cambio, en FS tardía sucedió lo inverso, las mejores respuestas se verificaron en longitudes de ciclo medias, como los GM IVc y IVL (Figura 6). La FS tardía estabiliza el rendimiento, pero restringe la respuesta a la fertilización, mientras que FS temprana y GM corto se traducen en mayor variabilidad en los rendimientos (Figura 6).

En la segunda campaña, 2017/18, la interacción entre variables se verifica de manera aún más pronunciada, en función de la sincronía entre período crítico y ocurrencia de precipitaciones. En 2017/18, el rango de rendimientos se amplió respecto del ciclo anterior, llegando a 3599 kg ha<sup>-1</sup>. La respuesta a la fertilización osciló entre 0 y 554 kg ha<sup>-1</sup>. Nuevamente, se determinó mayor respuesta a la fertilización en FS tempra-

**Tabla 5.** Tratamientos de fertilización en soja evaluados en los experimentos. Campañas 2016/17 (húmeda) y 2017/18 (muy seca). FS: temprana (inicios noviembre) y tardía (inicios diciembre).

		Fertilización	
		Control	P 20 + S 15 + Zn 0,7 + B 0,1
Grupo Maduración	GM III C	X	X
	GM III L	X	X
	GM IV C	X	X
	GM IV L	X	X
	GM V C	X	X

P20: Superfosfato Triple de calcio (0-20-0) 100 kg ha<sup>-1</sup>;  
S15: Sulfato de calcio (0-18-0) 83 kg ha<sup>-1</sup>



na, aunque las diferencias fueron más escasas respecto de la campaña previa, siendo de 337 y 206 kg ha<sup>-1</sup> para FS temprana y tardía, respectivamente (Figura 7).

Considerando la respuesta a la fertilización y su interacción con FS y GM, en la FS temprana los mejores incrementos de rendimiento por agregar PSMi-cronutrientes se observaron en los grupos intermedios, IIIc, IVc y VL, mientras que disminuyó en los extremos, IIIc y Vc. La segunda fecha, de menor productividad, presentó nuevamente un comportamiento diferencial. Los ciclos más cortos, que conservaron agua en el suelo hacia el llenado de los granos, mostraron una respuesta similar a la siembra temprana. Sin embargo, y conforme avanzaba el ciclo, el cultivo fue ingresando en un progresivo estrés hídrico, que afectó en mayor medida a los GM más largos. La respuesta disminuyó levemente hacia el GM IVc, desplomando a valores mínimos o nulos en los GM IVL y Vc. Sólo en combinaciones favorables de FS \* GM se determinó respuesta positiva a la fertilización. Un GM poco adaptado significó no sólo condicionar la respuesta, sino también una grave penalidad en los rendimientos.

En definitiva, la diversidad existente en fertilidad de suelos, clima y variabilidad de precipitaciones determina cambios interanuales y sitio-específicos en la jerarquía y comportamiento de GM, FS y nivel de fertilización. Aun en escenarios edáficos similares, la respuesta a la fertilización estuvo condicionada por la constitución de un buen ambiente climático, estando en el borde de la

interacción estadística y con interacción práctica con Año y GM. Esta aproximación constituye una novedad en el manejo de nutrientes para soja, cuyo diagnóstico tradicionalmente se ha basado en parámetros de suelo.

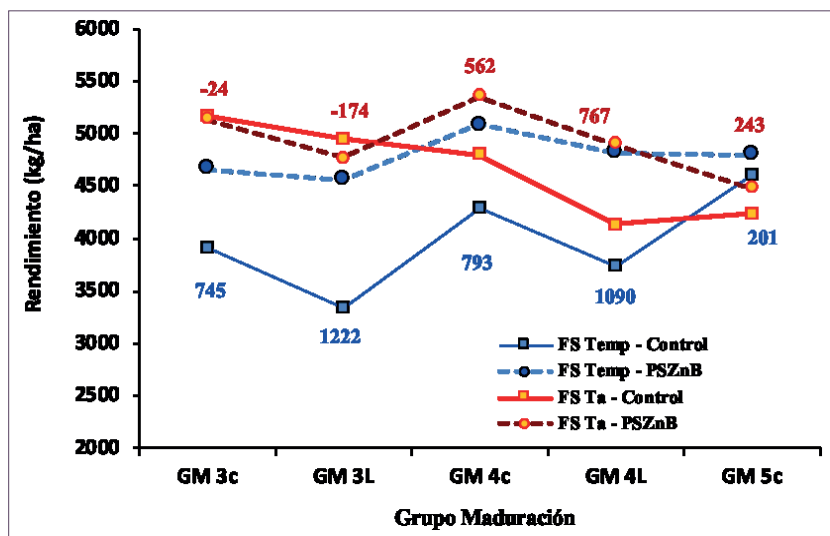


Figura 6. Rendimientos de grano según fecha de siembra (FS), grupo de maduración (GM) y nivel de fertilización. EEA INTA Pergamino, campaña 2016/17. Las cifras sobre los puntos indican la diferencia (kg ha<sup>-1</sup>) entre fertilizado con PS + ZnB y Control, para igual GM y FS. El componente año representa un ambiente que integra el año climático, sitio y nivel inicial de nutrientes en suelo.

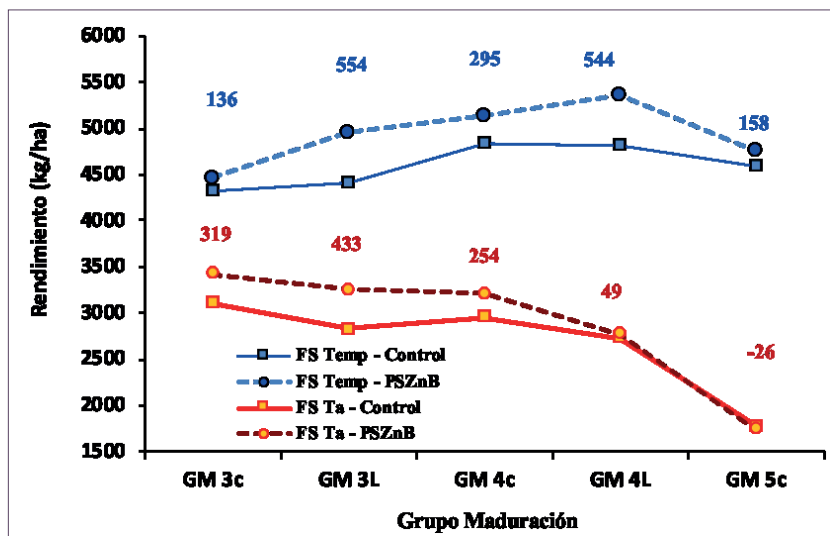


Figura 7. Rendimientos de grano según fecha de siembra (FS), grupo de maduración (GM) y nivel de fertilización. EEA INTA Pergamino, campaña 2017/18. Las cifras sobre los puntos indican la diferencia (kg ha<sup>-1</sup>) entre fertilizado con PS + ZnB y Control, para igual GM y FS. El componente año representa un ambiente que integra el año climático, sitio y nivel inicial de nutrientes en suelo.

## Bibliografía

- Adams, T. C., Brye, K. R., Purcell, L. C., Ross, W. J., Gbur, E. E., & Savin, M. C. 2018. Physiological Plant Response Differences among High-and Average-Yield Soybean Areas in Arkansas. *Crop, Forage & Turfgrass Management*, 4(1).
- Aramburu Merlos, F. A., Monzon, J. P., Mercáu, J. L., Taboada, M., Andrade, F. H., Hall, A. J. & Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*, 184, 145-154.
- Battenfield, S. D., Guzmán, C., Gaynor, R. C., Singh, R. P., Peña, R. J., Dreisigacker, S., & Poland, J. A. 2016. Genomic selection for processing and end-use quality traits in the CIMMYT spring bread wheat breeding program. *The plant genome*, 9(2).
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Parker, P. S., Nendel, C., Gil, M. D. S., Farias, J. R., & Basso, C. J. 2018.a. Assessment of crop-management strategies to improve soybean resilience to climate change in Southern Brazil. *Crop and Pasture Science*, 69(2), 154-162.
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pascoalino, J. A. L., Sako, H., de Sá Dantas, J. P., & Moraes, M. F. 2018.b. Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. *International Journal of Plant Production*, 1-10.
- Divito, G. A., Echeverría, H. E., Andrade, F. H., & Sadras, V. O. 2016. Soybean shows an attenuated nitrogen dilution curve irrespective of maturity group and sowing date. *Field Crops Research*, 186, 1-9.
- Edreira, J. I. R., Specht, J. E., Grassini, P., Mourtzinis, S., Conley, S. P., Roth, A. C., & Kyveryga, P. M. 2017. Key Management Practices That Explain Soybean Yield Gaps Across the North Central US. In *Integrated Crop Management Conference* (p. 13).
- Ferraris, G. N., & Arias Usandivaras, L. M. 2018. Respuesta diferencial a estrategias de nutrición en cultivares de trigo y cebada cervecera. *Revista de Tecnología Agropecuaria*. INTA EEA Pergamino. Vol 10, N°36
- Ferraris, G. y F. Mousegne. 2016. La nutrición como herramienta para alcanzar los rendimientos potenciales en soja. Ambiente productivo, fertilización y rendimiento de distintos grupos de madurez en soja. *Revista de Tecnología Agropecuaria*, INTA EEA Pergamino. RTA / Vol. 10 / N° 32. pp 11-15.
- Ferraris, G. y M. Díaz Zorita. 2015. Variación del rendimiento y sus componentes en dos fechas de siembra de soja según nivel tecnológico. *Revista de Tecnología Agropecuaria*, INTA EEA Pergamino. N°1: pp 34-37.
- Ferraris, G., García, L., Navarro, M. 2014. La nutrición como herramienta para alcanzar los rendimientos potenciales en soja. Comisión III. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas" Producción sustentable en ambientes frágiles. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Ferraris, G.N, M. Toribio, R. Falconi y F. Moriones. 2017. Estrategias de fertilización: efectos sobre rendimientos, balance de nutrientes y fertilidad de los suelos. *ACTAS Resumen de Talleres*. XXIV Congreso AAPRESID 2017. "Kairos". Rosario, 1 a 4 de Agosto de 2017.
- Fischer, R.A. 2015. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Res.* 182, 9-18.
- Guilpart, N., Grassini, P., Sadras, V. O., Timsina, J., & Cassman, K. G. 2017. Estimating yield gaps at the cropping system level. *Field Crops Research*, 206, 21-32.
- Junior, C. P., Kawakami, J., Schwarz, K., Umburanas, R. C., Del Conte, M. V., & Müller, M. M. L. 2017. Sowing Dates and Soybean Cultivars Influence Seed Yield, Oil and Protein Contents in Subtropical Environment. *Journal of Agricultural Science*, 9(6), 188.
- Monzón, J.P. 2015. Atlas Mundial de Brechas de Rendimiento: Trigo, soja y maíz en Argentina. pp 55-59. En: *Actas Simposio Fertilidad 2015 "Nutriendo los suelos para las generaciones del futuro"*. IPNI Cono Sur – AC Fertilizar. Rosario, 19 y 20 de Mayo de 2015. 252 pp.
- Monzón, J.P., Mercáu, J.L., Andrade, J.F., Caviglia, O.P., Cerrudo, A.G., Cirilo, A.G., Vega, C.R.C., Calvino, P.A., 2014. Maize-soybean intensification alternatives for the Pampas. *Field Crops Res.* 162, 48-59.
- Moreira, A., Moraes, L. A. C., Schroth, G., Becker, F. J., & Mandarino, J. M. G. 2017. Soybean yield and nutritional status response to nitrogen sources and rates of foliar fertilization. *Agronomy Journal*, 109(2), 629-635.
- Orlowski, J. M., Haverkamp, B. J., Laurenz, R. G., Marburger, D., Wilson, E. W., Casteel, S. N., & Ross, W. J. 2016. High-input management systems effect on soybean seed yield, yield components, and economic break-even probabilities. *Crop Science*, 56(4), 1988-2004.
- Orlowski, J. M., Haverkamp, B. J., Laurenz, R. G., Marburger, D., Wilson, E. W., Casteel, S. N., & Ross, W. J. 2016. High-input management systems effect on soybean seed yield, yield components, and economic break-even probabilities. *Crop Science*, 56(4), 1988-2004.
- ROET. 2019. Red oficial de ensayos territoriales de Trigo. INASE. Disponible on line: <https://www.argentina.gob.ar/inase/red-de-ensayos-comparativos-de-variedades-de-trigo/campana-20182019>.
- Rotundo, J., Borrás, L. 2013. ¿Cómo podemos aumentar los rendimientos de soja? La visión ecofisiológica. pp 36 – 37. Simposio Fertilidad 2013 "Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable". Rosario, 22 y 23 de Mayo de 2013.
- Sadras, V.O., Cassman, K.G., Grassini, P., Hall, A.J., Bastiaansen, W.G.M., Laborte, A.G., Milne, A.E., Sileshi, G., Steduto, P. 2015. Yield Gap Analysis of Rainfed and Irrigated Crops: Methods and Case Studies. (Water Reports No. 41). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Singh, S., Singh, V., Shukla, R. D., & Dubey, D. 2018. Influences of sulphur and zinc levels on soybean and residual effect on succeeding crop in soybean-wheat cropping system. *IJCS*, 6(3), 1130-1134.
- Suman, J., Dwivedi, B. S., Dwivedi, A. K., & Pandey, S. K. 2018. Interaction Effect of Phosphorus and Sulphur on Yield and Quality of Soybean in a Vertisol. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 7(3), 152-158.
- Wang, L., Palta, J. A., Chen, W., Chen, Y., & Deng, X. 2018. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling. *Agricultural Water Management*, 197, 41-53. ◀

# Fertilización foliar: ¿Por qué? ¿Para qué?

César E. Quintero

Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Universidad Nacional de Entre Ríos  
cquinter@fca.uner.edu.ar

## Introducción

La fertilización foliar o la nutrición de las plantas a través de las hojas es un tema que se conoce desde hace más de cien años. Sin embargo, la técnica de fertilización foliar es mucho menos utilizada que la de aplicación de fertilizantes al suelo para ser absorbidos por las raíces. Esto, como muchas otras cosas, puede ser debido a un mayor desconocimiento de esta práctica.

Una revisión bibliográfica en los buscadores de trabajos científicos como SCOPUS muestra que el tema "fertilización foliar" viene produciendo resultados crecientes. Hace 10 años se publicaban unos 100 trabajos por año, hace cinco unos 150 y actualmente más de 200 reportes o publicaciones científicas sobre el tema. La mayoría de los estudios se enfocan en los mecanismos de absorción. El nutriente más estudiado es el nitrógeno (N), seguido del zinc (Zn), el boro (B) y el hierro (Fe). Los cereales son los cultivos más estudiados, pero existen muchos informes sobre otros cultivos, frutales y cítricos (Woogt et al., 2013).

La aplicación foliar de nutrientes es una estrategia importante de manejo para maximizar los rendimientos de los cultivos que puede complementar la fertilización del suelo. Cuando los nutrientes se aplican a los suelos, son absorbidos por las raíces de las plantas y se trasladan a las partes aéreas. En caso de aplicación foliar, los nutrientes penetran en la cutícula de la hoja o los estomas y luego ingresan a las células. Por lo tanto, la respuesta del cultivo ocurre en poco tiempo en la aplicación foliar en comparación con la aplicación al suelo (Fageria et al., 2009).

## Bases fisiológicas para la fertilización foliar

Las plantas que cultivamos evolucionaron hacia un medio terrestre y desarrollaron toda una estructura anatómica, fisiológica y morfológica para absorber el agua y los minerales por las raíces desde el suelo y, por otro lado, evitar la deshidratación en la parte aérea expuesta al aire

como las hojas. Por lo cual, es lógico y razonable pensar que la vía natural de absorción de los nutrientes minerales es a través de las raíces. Sin embargo, no hay que olvidar que los primeros vegetales existieron en un medio acuático y absorbían los nutrientes y el agua a través de toda su piel; y esta capacidad no se ha perdido.

La fertilización tradicional al suelo es la más utilizada y racionalmente aceptada. Los nutrientes que ponemos en el suelo con los fertilizantes deben sobrellevar una serie de pasos o procesos para que finalmente lleguen al interior de la planta y ejerzan su acción metabólica. Normalmente, los fertilizantes en el suelo se deben disolver, moverse hasta las raíces, ser absorbidos y translocados hasta el punto de crecimiento de la planta. En todo este camino a través del suelo y de la planta, el nutriente puede perderse (volatilizarse, lixivarse, lavarse); formar compuestos insolubles (precipitar, adsorberse) y no todo lo aplicado es aprovechado. Debido a esto es que la eficiencia de uso de los fertilizantes tradicionales no es lo que uno quisiera. En el caso de la fertilización de cereales con N, se sabe que la eficiencia de utilización del N es inferior al 50%. Para el caso del fósforo (P), que interactúa muy fuertemente con los sólidos del suelo, la eficiencia de utilización es mucho más baja aún. Esto ha llevado, en algunos países, al uso de dosis de fertilizantes elevadas y consecuentemente a la contaminación de suelos y aguas (Fernández et al., 2013). La fertilización foliar surge hoy entonces como una alternativa más amigable con el ambiente dado que el nutriente colocado directamente sobre el tejido vegetal, durante el período crítico de requerimiento, tendría una eficiencia de utilización muy superior (Marschner, 2012).

Dicho así parece fácil, pero el nutriente en primer lugar debe llegar a la superficie de la hoja, permanecer en una forma soluble como para luego ser absorbido y translocado al sitio de acción. Es decir que se deben considerar todas las recomendaciones y desarrollos tecnológicos para que esto sea posible. La aplicación de un

nutriente por vía foliar debe ser de muy alta calidad (tamaño de gotas y número de impactos por superficie) para lograr cobertura sobre la hoja, pero además debe estar protegido para resistir la degradación, el desecamiento y el lavado en caso de lluvia.

Las plantas están cubiertas por una cutícula de cera hidrófoba que controla la pérdida de agua, solutos y gases con el medio ambiente, y a la inversa también impide su entrada sin restricciones en el interior de la planta. Las características estructurales y químicas de la superficie de la planta hacen que sea difícil la humectación y, por lo tanto, la permeación por una solución nutritiva polar como el agua, aplicada en la superficie. Sin embargo, hoy sabemos que las superficies de las plantas son permeables a las soluciones de nutrientes. La facilidad con la que una solución de nutrientes puede penetrar en el interior planta dependerá de las características de la superficie de la planta, que pueden variar con el órgano, especie, variedad y condiciones de cultivo. Las estructuras epidérmicas, tales como estomas y lenticelas, que pueden estar presentes en hojas y frutos, son permeables a las soluciones aplicadas en la superficie y pueden desempeñar un papel significativo en su absorción. Se han encontrado sustancias apolares lipofílicas capaces de cruzar las cutículas mediante un proceso de solución-difusión.

Dado que las superficies de las plantas son hidrófobas en mayor o menor grado, las soluciones de nutrientes en agua pura (no formulado) están limitadas en su absorción por el follaje. Por lo tanto, es importante utilizar formulaciones foliares con adecuadas formas de nutrientes y adyuvantes para que la eficacia global de los fertilizantes foliares pueden ser optimizada. Los factores ambientales como la humedad relativa y/o la temperatura afectan las propiedades físicas y la eficacia de una formulación fertilizante foliar y estos deben ser tenidos en cuenta antes de aplicar los tratamientos de pulverización.

Las especies cultivadas difieren notablemente en las características de las superficies de las hojas y por lo tanto, la predicción de la respuesta del cultivo a cualquier formulación es imposible en la actualidad. El medio ambiente afecta a todos los aspectos de la fertilización foliar; desde las reacciones físicas y químicas del caldo de pulverización; a la arquitectura de la planta; la composición cuticular de hojas; y el destino de los nutrientes una vez que entran a la planta. La fenología de la planta también tiene un gran

efecto sobre la composición cuticular y, por lo tanto, la eficacia de la fertilización foliar.

La movilidad de un elemento nutriente en el floema tiene un profundo efecto sobre la capacidad de las plantas para absorber, trasladar y beneficiarse de fertilizantes foliares y por lo tanto tiene un papel importante en la determinación de su eficacia. La aplicación foliar de nutrientes floema-inmóviles (Ca-B-Mn-Si) sólo benefician a los tejidos que reciben directamente la pulverización foliar. La aplicación foliar de nutrientes móviles (N-P-K-S-Mg) tiene el potencial para el beneficio sistémico y de largo alcance. Las limitaciones a la cantidad de nutrientes que se puede aplicar y la rápida dilución de los nutrientes aplicados debida a la movilización dentro de la planta reducen el potencial beneficio de aplicaciones foliares de nutrientes-floema móvil. Algunos nutrientes tienen movilidad intermedia o restringida (Fe-Zn-Cu-Mo). Pero para todos los nutrientes (móviles e inmóviles), **el papel más relevante de la fertilización foliar es prevenir deficiencias inmediatas y transitorias que no se pueden abordar de forma rápida por aplicaciones al suelo.**

Las interacciones entre la fenología del cultivo y el medio ambiente pueden determinar la utilidad de la fertilización foliar.

### ¿Cuándo se dan condiciones oportunas para la fertilización foliar?

Fernández et al. (2013) enumeran las condiciones ventajosas en las cuales la fertilización foliar puede ser exitosa:

1. Cuando el abastecimiento de algunos nutrientes por parte del suelo es deficiente y no se ha fertilizado adecuadamente por la vía tradicional. La deficiencia de nutrientes no fue detectada o considerada previamente o la fertilización fue desbalanceada. También cuando el suelo tiene condiciones que limitan la disponibilidad de nutrientes como el pH alto o gran fijación o adsorción de elementos como el P, o son muy arenosos.
2. En algunas circunstancias, los períodos de pico crecimiento de los cultivos inducen a una demanda de nutrientes que excede el suministro de nutrientes incluso en un suelo fértil o bien fertilizado. La demanda de nutrientes para el rápido crecimiento de la fruta o de llenado de granos puede exceder la capacidad de absorción de la planta o el abastecimiento del suelo. La competencia entre las raíces y brotes



durante los períodos de alta demanda puede reducir la asignación de carbohidratos a las raíces y restringir el crecimiento de las raíces su metabolismo y, por lo tanto, también reducir la adquisición de nutrientes.

3. En los frutales, durante principios de la primavera, cuando muchas especies de hoja caduca florecen y fructifican y la humedad o temperatura del suelo no son favorables para la absorción de nutrientes del suelo.
4. La arquitectura de la planta y el desarrollo de órganos crean una demanda local de nutrientes que excede la capacidad de entrega o transporte dentro de la planta. Las limitaciones en el transporte de elementos del floema-inmóviles a órganos con conectividad vascular inadecuada o baja transpiración; como por ejemplo, deficiencias de B o Ca en frutas y órganos carnosos. También deficiencias de B, Cu, Fe, Zn en estructuras reproductivas (fertilización floral).
5. Biofortificación de cultivos. Especialmente para mejorar el contenido de Fe y Zn en los granos y su biodisponibilidad como alimentos.

Dada la gran complejidad de interacciones y las incertidumbres teóricas que rigen aún sobre la fertilización foliar, los ensayos de campo y las pruebas en ambientes controlados seguirán desempeñando un papel fundamental en la adaptación de la teoría a la práctica en el terreno. Igualmente importante es reconocer que los resultados obtenidos de los ensayos de campo no pueden generalizarse sin considerar las condiciones específicas que prevalecieron durante el ensayo y las características del cultivo utilizado.

La fertilización foliar actualmente se está acoplando o asociando con la aplicación de productos bioestimulantes. Los bioestimulantes vegetales son sustancias o materiales (con la excepción de los nutrientes y pesticidas) que, cuando se aplican a las plantas, semillas o sustratos en formulaciones específicas, tienen la capacidad de modificar los procesos fisiológicos en las plantas de una manera que ofrecen beneficios potenciales para el crecimiento, el desarrollo, o la respuesta al estrés. Esta definición incluye una variedad de sustancias como extracto de algas, sustancias húmicas, aminoácidos y bacterias promotoras del crecimiento. Los bioestimulantes han demostrado que aumentan la absorción de nutrientes bajo ciertas condiciones, lo que sugiere su utilidad en la reducción del uso de fertilizantes sin afectar negativamente el rendimiento.

## ¿Sirve el análisis de plantas? ¿Cómo lo utilizo?

El análisis de tejidos vegetales es útil para conocer el estado nutricional de los cultivos, confirmar síntomas, hacer recomendaciones, etc. Se lo utiliza desde hace muchos años, pero en mucha menor medida que el análisis de suelos. Correndo y García (2012) presentan una descripción de la utilidad de los análisis vegetales como herramienta de diagnóstico. Remarcan la importancia del muestreo y la interpretación de los resultados.

Generalmente se hace una analogía con el análisis de suelos y se cree que se puede tomar una muestra de tejidos, hacer un diagnóstico y una recomendación de fertilización; lo cual no está del todo errado. Sin embargo, en los cultivos anuales se recomienda tomar las muestras de hojas al inicio de la etapa reproductiva de floración. El tiempo entre que se toman las muestras, llegan al laboratorio y se obtienen los resultados, puede extenderse entre 15 y 30 días. Esto determina que la oportunidad de corrección por fertilización foliar en estos casos pueda ser tarde. Sin embargo, el seguimiento sistemático del estado nutricional de los cultivos mediante análisis foliares, permite detectar deficiencias o desbalances, que son frecuentes en algunas condiciones, situaciones o regiones y corregirlas dentro del plan de fertilización (Arévalo, 2015; Grasso y Díaz-Zorita, 2018).

Un ejemplo de su utilidad se puede apreciar en la **Tabla 1** que presentan Grasso y Díaz-Zorita (2018). En maíz, el 54% de los casos evaluados presentaron niveles insuficientes de N, 56% de P y 65% de S. En soja, el 52% de los casos con limitaciones de P y 31% de S. En el caso de las gramíneas de invierno, sólo en cebada encontraron potenciales limitaciones en el 25% de los casos con P y 38% de casos con S.

Otro caso que es un ejemplo interesante de la utilización de los análisis foliares lo presenta Arévalo (2015). Sobre más de 100 muestras de hojas de soja tomadas en la zona núcleo, aplicando la metodología DRIS, encuentra que para los sistemas de producción de Argentina, el nutriente que limitó mayormente el rendimiento fue el azufre, le siguen nitrógeno, magnesio y potasio. Entre los micronutrientes, cobre y zinc fueron los más deficientes, mientras que manganeso, en general se presentó desde suficiente a excesivo en nuestro país.

¿Qué utilidad tienen estos análisis? El haber realizado análisis de tejidos vegetales no implica que debamos hacer una fertilización foliar. Nos ayuda a planificar la estrategia de fertilización en

los próximos años. Los ejemplos colocados más arriba nos muestran que estamos dosificando con bajas cantidades de P y S fundamentalmente; que nutrientes que ni consideramos (como el K) pueden encontrarse en niveles insuficientes. Algunos micronutrientes también pueden ser deficitarios.

Entonces, ¿qué pasa? Si no fertilizamos adecuadamente de manera tradicional, porque el campo es arrendado o por otra razón empresarial o personal, los cultivos presentarán deficiencias que serán severas o importantes en los períodos de máximo crecimiento y entonces tenemos potencial de respuesta a la fertilización foliar.

### ¿Que expectativa de respuesta a la fertilización foliar tenemos?

Dado que la posibilidad de aplicar nutrientes por las hojas tiene limitaciones fisiológicas en las

cantidades a colocar en cada aplicación (por la fitotoxicidad) y económicas (dados los costos de la aplicación) que reducen el número de aplicaciones. Las expectativas de respuestas son proporcionales a las cantidades aportadas respecto a la demanda. Las cantidades de macronutrientes que se pueden aplicar en una sola vez es de pocos  $\text{kg ha}^{-1}$ , normalmente menos de  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  para N o de 1 a  $2 \text{ kg ha}^{-1}$  para P, dependiendo del volumen de caldo. Para los micronutrientes es posible aplicar desde  $100 \text{ g ha}^{-1}$  hasta  $1 \text{ kg ha}^{-1}$  o más. Para los macroelementos es muy difícil cubrir la demanda total por fertilización foliar; pero en el caso de micronutrientes es factible (Tabla 2).

La aplicación de 5 a  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  de N por vía foliar en soja en R3 frente a un consumo potencial de  $429 \text{ kg ha}^{-1}$  parece muy poco relevante. Sin embargo, los ensayos de Moreira et al. (2017) durante 3 años en Brasil mostraron un promedio

**Tabla 1.** Proporción de casos con deficiencias o suficiencia de nutrientes en base a 900 análisis de tejidos foliares según resultados compilados por Fertilizar AC en la región pampeana. Los rangos de suficiencia corresponden a Correndo y García (2012).

	N		P		S		Diagnóstico
	Clase	% Casos	Clase	% Casos	Clase	% Casos	
Trigo	<1.75	5%	<0.2	12%	-	-	Déficit Nutricional
	1.75-3.3	95%	0.2-0.5	88%	>0.4	100%	Rango Suficiencia
Cebada	<1.2	6%	<0.2	25%	<0.15	38%	Déficit Nutricional
	1.2-1.7	94%	0.2-0.5	75%	0.15-0.4	62%	Rango Suficiencia
Soja	<3.5	8%	<0.3	52%	<0.2	31%	Déficit Nutricional
	3.5-5.5	92%	0.3-0.6	48%	0.2-0.6	69%	Rango Suficiencia
Maíz	<3.0	54%	<0.3	57%	<0.15	65%	Déficit Nutricional
	3.0-5.0	46%	0.3-0.6	43%	0.15-0.4	35%	Rango Suficiencia

**Tabla 2.** Acumulación de nutrientes en cultivos de alto rendimiento. Soja con promedio de ensayos de  $6.6 \text{ tn ha}^{-1}$  (Bart, et al. 2018) y Maíz con rendimiento medio de granos  $12.2 \text{ tn ha}^{-1}$  (Bender, et al. 2013).

	Soja		Maíz	
	Absorción total ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Máxima Tasa ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	Absorción total ( $\text{kg ha}^{-1}$ )	Máxima Tasa ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
Biomasa	15 554	162	23 000	432
N	429	5.4	286	8.8
P	34	0.49	50	1.05
K	177	1.89	182	5.49
Ca	100	1.36	-	-
Mg	43	0.50	59	2.2
S	19	0.27	26	0.6
	( $\text{g ha}^{-1}$ )	( $\text{g ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )	( $\text{g ha}^{-1}$ )	( $\text{g ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ )
B	250	3.3	83	3.5
Cu	100	1.4	141	1.5
Fe	1695	17	1376	99.6
Mn	796	11	558	18.2
Zn	344	4.8	498	14.7

de rendimiento de 4257 kg ha<sup>-1</sup> para el testigo sin N, con 5 kg ha<sup>-1</sup> de N foliar 4468 kg ha<sup>-1</sup> y con 10 kg ha<sup>-1</sup> de N foliar 4510 kg ha<sup>-1</sup> de granos. Esto es un 5% a 6% de respuesta (200-250 kg ha<sup>-1</sup>) estadísticamente significativa. La cantidad aplicada por vía foliar cobra relevancia en comparación con la tasa de absorción diaria de N (Tabla 2). En el momento de máxima tasa de absorción, el sistema suelo-soja-rizobio no puede satisfacer la demanda. Los hallazgos de este estudio se encuentran en línea con lo informado por Cafaro La Menza et al. (2017) quienes indican que el N limita el rendimiento de la soja en ambientes con alto rendimiento potencial, donde las fuentes indígenas de N parecen insuficientes para satisfacer completamente los requisitos del N de cultivo. La respuesta a la fertilización con N puede ocurrir por encima de un umbral de 2500 kg ha<sup>-1</sup> de rendimiento potencial y sería de hasta 250 kg ha<sup>-1</sup>.

En el caso de cereales como el trigo, el uso de N foliar puede incrementar el rendimiento y mejorar la calidad del grano. Esto se puede apreciar en un ensayo realizado en Pergamino sobre 9 cultivares de trigo y dos de cebada (Ferraris y Arias Usandivaras, 2018). El testigo fertilizado de manera tradicional con 100 kg ha<sup>-1</sup> de SPT más 120 kg ha<sup>-1</sup> de urea rindió en promedio 4630 kg ha<sup>-1</sup> con 10.9% de proteína. Mientras que al que se le agregó 10 kg ha<sup>-1</sup> de N foliar rindió 5250 kg ha<sup>-1</sup> con 11.4%. Esto significa una respuesta en grano de 13% y de proteína de 19%.

Si bien en el caso de los micronutrientes es posible cubrir la demanda total por vía foliar, dado que la respuesta a estos elementos menores es relativamente baja, el aumento de rendimiento por fertilización foliar con micronutrientes es del orden de 5% a 15% normalmente. Uno de los elementos que más generalizada y consistente respuesta muestra en la región pampeana es el Zn. Las aplicaciones foliares de Zn han mostrado buenas respuestas en arroz, maíz, soja y otros cultivos.

## Conclusión/síntesis

En términos generales, Argentina presenta una muy baja tasa de aplicación de fertilizantes, siendo una de las zonas agrícolas del mundo con mayor desbalance de fósforo y otros elementos como el potasio. Sin embargo, existen productores que aplican alta tecnología y fertilizan adecuadamente.

Los fertilizantes foliares podrían mejorar los rendimientos en ambos casos. Sobre todo si se aplican como complemento o como aporte extra que se suma a la fertilización que se realiza actualmente.

En los cultivos anuales de grano, la fertilización foliar puede ser beneficiosa cuando existen deficiencias claras de algún elemento como Zn o N y cuando las aplicaciones coinciden con el inicio del período de mayor demanda de nutrientes.

## Bibliografía

- Arévalo E.S. 2015. Evaluación del estado nutricional del cultivo de soja en Argentina. Tesis Doctoral. Universidad de La Coruña. España.
- Barth G., Francisco E., Tamie Suyama J. y García F. 2018. Nutrient Uptake Illustrated for Modern High-Yielding Soybean. Better Crops/Vol. 102. <http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/article/BC102111>
- Bender R.R., Haeghele J.W., Ruffo M.L. y Below F.E. 2013. Modern Corn Hybrids' Nutrient Uptake Patterns. Better Crops/Vol. 97.
- Cafaro La Menza N., Monzonb J.P., Spechta J.E. y Grassini. P. 2017. Is soybean yield limited by nitrogen supply? Field Crops Research 213: 204-212.
- Correndo D. y García F. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico: Cultivos extensivos. Archivo Agronómico N°14. IPNI Cono Sur. <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1155>
- Fageria N.K., Barbosa Filho M.P., Moreira A. y Guimarães C.M. 2009. Foliar Fertilization of Crop Plants. Journal of Plant Nutrition. 32: 1044-1064.
- Fernández V., Sotiropoulos T. y Brown P. 2013. Foliar Fertilization: Scientific Principles and Field Practices. Paris. International Fertilizer Industry Association.
- Ferraris. G.N. y Arias Usandivaras L. M. 2018. Respuesta diferencial a estrategias de nutrición en cultivares de trigo y cebada cervecera. Revista de Tecnología Agropecuaria. INTA EEA Pergamino. Vol 10. N°36. <https://inta.gob.ar/documentos/respuesta-diferencial-a-estrategias-de-nutricion-en-cultivares-de-trigo-y-cebada-cervecera>
- Grasso A. y Díaz-Zorita M. 2018. Valorización de estrategias de fertilización en la región pampeana. Congreso Anual AAPRESID. Rosario. Santa Fe.
- Marschner P. 2012. Mineral Nutrition of Higher Plants. San Diego: Academic Press.
- Moreira A., Moraes L.A.C., Schroth G., Becker F.J. y Mandarino J.M.G. 2017. Soybean Yield and Nutritional Status Response to Nitrogen. Sources and Rates of Foliar Fertilization. Agron. J. 109:629-635.
- Voogt. W., Blok C., Eveleen. B., Marcelis. L. y Bindraban. P. 2013. Foliar Fertilizer Application. Preliminary review. VFRC Report 2013/2. 36 pg. ◀

## ¿Hay una receta para la fertilización perfecta?

Martin Díaz-Zorita

Fertilizar Asociación Civil y Bayer Crop Sciences

martin.diazzorita@bayer.com

El desafío de incrementar la producción agrícola con un impacto ambiental mínimo requiere la continua búsqueda de maximización de la eficiencia en la captura de recursos tanto la radiación fotosintéticamente activa, el agua como el nitrógeno (N). Estos requisitos son incluidos en el concepto de intensificación ecológica y se ha observado que tal desafío puede lograrse al implementar en conjunto prácticas agrícolas. En el caso de maíz, estas prácticas consideran cultivar genotipos productivamente superiores en alta densidad de siembra y con aumentos en la dosis de N comparadas con las prácticas frecuentes en Argentina (Caviglia et al., 2019).

Los nutrientes son compuestos químicos necesarios para el metabolismo de las plantas que hacen al crecimiento y a la producción de los cultivos y la fertilización es la herramienta tecnológica para lograr su provisión complementando su disponibilidad natural. La contribución relativa del manejo de los nutrientes representa una brecha de al menos el 30% de la producción alcanzada por los cultivos. Por ejemplo, Stewart et al. (2005) analizó 362 campañas en estudios de larga duración en América del Norte, Inglaterra y regiones tropicales describiendo que solo en el caso de aportes de fósforo (P) y de potasio (K) estas brechas serían de entre 30% y 50%. Similares expectativas sobre la contribución de los nutrientes a los rendimientos, con diferencias entre regiones y cultivos, fueron descriptas en encuestas unos 1000 productores (Díaz-Zorita y Grasso, 2016). En concordancia con estas apreciaciones, en las áreas agrícolas argentinas son abundantes los estudios recientes que des-

criben frecuentes limitaciones nutricionales para el normal crecimiento y producción de cultivos. En general, tanto con estudios de análisis de indicadores de suelos (Sainz Rozas et al., 2013) como de análisis foliares en cultivos en producción (Grasso y Díaz-Zorita, 2018a), se identifican restricciones en la oferta de N, de P, de azufre (S) y de algunos micronutrientes (ej. zinc y boro) que requieren plantear estrategias de fertilización.

Acordes a las demandas específicas de diferentes sistemas de producción, los resultados de relevamientos del uso de fertilizantes para la producción de cultivos extensivos en Argentina muestran una amplia adopción de la práctica de fertilización. Anualmente, entre el 81% y el 90% de la superficie cultivada con cereales (maíz, sorgo, trigo y cebada) es fertilizada principalmente con fuentes nitrogenadas y fosfatadas mientras que algo menos del 50% del área con soja es fertilizada mayoritariamente con fertilizantes fosfatados (Fertilizar AC, 2019). Las necesidades de N en soja son complementadas en una alta proporción del área cultivada a partir de la inoculación (Peticari y Piccinetti, 2019). Si bien se ha incrementado la precisión en la formulación de recomendaciones para fertilización, las estrategias de implementación son dispares conduciendo también a diversas interpretaciones de sus resultados. El manejo actual de la fertilización de cereales es próximo a la implementación de decisiones para el logro de rendimientos medios regionales. No es así para el caso de soja en el que la aplicación de estrategias considerando recomendaciones de planteos de producción promedio mejoraría los rendimientos actuales (Tabla 1).

**Tabla 1.** Brechas de rendimientos entre el manejo actual y recomendaciones mejoradas de fertilización en secuencias de cultivos de la región pampeana (Adaptado de Grasso, 2019).

Recomendación	unidades	Maíz	Trigo o cebada	Soja	Soja2 <sup>da</sup>
Rendimientos medios	kg ha <sup>-1</sup>	514	47	480	150
	%	4	1	11	5
Alta producción	kg ha <sup>-1</sup>	2095	560	983	214
	%	16	9	23	7



La amplitud esperada de las contribuciones por fertilización, sólo planteada desde los aportes en rendimientos, sustenta el valor de establecer estrategias de manejo eficientes de la nutrición de cultivos dado su potencial rango de impacto sobre los resultados de producción. En algunos casos, la decisión de fertilización representa casi un tercio de los costos directos de producción de los cultivos. La elaboración de recomendaciones de fertilización muestra una continua evolución desde el reconocimiento exploratorio de su contribución general hasta la integración en modelos complejos específicos (Díaz-Zorita, 2017) (Figura 1). Es propósito de esta presentación analizar y discutir la factibilidad y consideraciones para diseñar estrategias estandarizadas de manejo de la fertilización en el marco de sistemas productivos argentinos.

### Algunos elementos de decisión al fertilizar

La implementación de los planteos de fertilización, independientemente de su escala de ejecución, cultivo o región, es el resultado de sucesivas decisiones que contemplan diversos niveles de conocimiento y aproximaciones cuantitativas y cualitativas. Uno de los planteos de estrategias de fertilización es la de reiterar la práctica más común en la región en la medida que los rendimientos no sean mayormente limitados mostrando pérdidas de producción. Esta aproximación, si bien en promedio puede ser

equilibrada en los resultados económicos de los planteos productivos, captura moderadamente otras mejoras de manejo tales como la incorporación de genotipos mejorados o de ajustes en la estructura de los cultivos.

La inclusión de los análisis de suelos y otra información relacionada con la producción conduce estrategias mejoradas de manejo de la fertilización. Sin embargo, su implementación es aún poco empleada, entre varios factores, por la escasa caracterización de los suelos en los sitios productivos (García y Ciampitti, 2010), las discusiones sobre los diversos criterios de interpretación en la elaboración de las recomendaciones de fertilización (Leikam et al., 2010) y en los rangos de niveles críticos de referencia (Gutiérrez Boem, 2013). Además, la eficiencia media estimada de aprovechamiento de los aportes de P aplicados al aplicar bajo prácticas tradicionales de fertilización es inferior al 20% mientras que, en el caso del N, es próxima al 50% (Rubio et al., 1999; Novoa y Loomis, 1981). Es por esto por lo que, luego de una adecuada cuantificación de la demanda y de la disponibilidad de cada nutriente, otro de los desafíos de mejora se centra en la estrategia de ejecución de la práctica que también conduce a dispersas opciones de recomendación asociadas a las restricciones operativas presentes (ej. fuentes disponibles, equipamientos de aplicación, condiciones hídricas, etc.).

La predicción certera de las necesidades de N

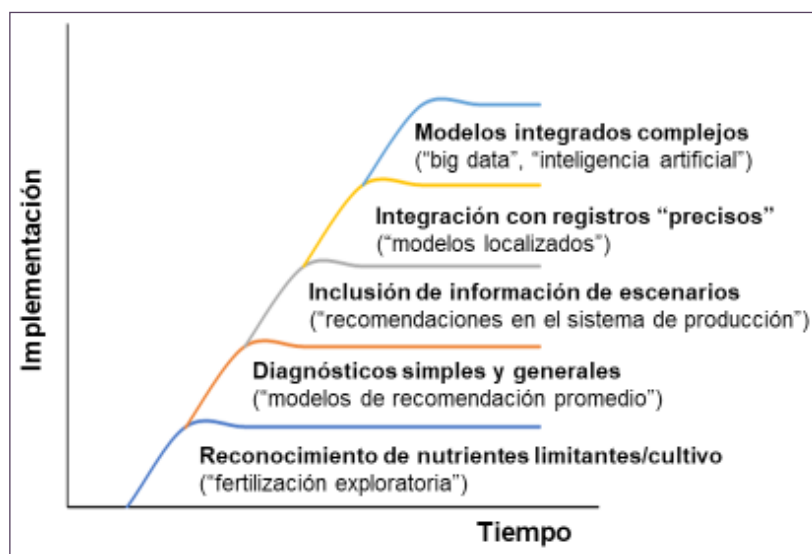


Figura 1. Secuencia general de la evolución de mejoras en la eficiencia de recomendaciones de fertilización (Díaz-Zorita, 2017).

de los cultivos, por ejemplo, maíz, es un desafío dados los efectos de las lluvias, la temperatura y las interacciones con las propiedades del suelo sobre el ciclo del N. Es por esto por lo que el continuo mejoramiento de las recomendaciones de N es no solo un desafío rentable sino crítico por la reducción de pérdidas potenciales hacia el medioambiente (Morris et al., 2018). Estos elementos amplían continuamente la revisión de los propósitos de la implementación de la fertilización y su formulación específica en cada modelo empresarial.

Las necesidades de nutrientes son estimadas por diferentes aproximaciones tales como el rendimiento objetivo (o expectativa productiva), el retorno máximo por unidad de nutriente aplicada según curvas de respuesta a la fertilización y otros incluyendo la interpretación de propiedades de suelos. En el caso del manejo de necesidades de N para la producción de maíz son diferentes los indicadores de utilidad entre los que se encuentran, entre otros, la oferta potencial de N, las cantidades de nitratos en varias profundidades y momentos de evaluación (Morris et al., 2018). Del mismo modo, son diversos los parámetros y aproximaciones a considerar para predecir el crecimiento de los cultivos y de allí estimar la demanda de nutrientes.

Es creciente la disponibilidad de servicios de sensores remotos para la predicción del rendimiento y el diagnóstico del estado nutricional de cultivos. Peralta et al. (2018), partir del análisis comparativo de plataformas y sensores en estudios combinados de híbridos de maíz, densidades de siembra y dosis de fertilización con N desarrollados en la región pampeana, describieron varios modelos predictivos de rendimiento y de caracterización del estado de nutrición de N. Sus resultados muestran que la integración de estos modelos aplicados durante la estación de crecimiento del cultivo permitiría desarrollar recomendaciones mejoradas de fertilización nitrogenada y mejorando la eficiencia de uso del fertilizante.

La dosis de fertilización no es el único factor que influye sobre la disponibilidad de nutrientes para las plantas durante su crecimiento. Es por esto por lo que las recomendaciones requieren ser estimadas considerando otros factores de sitio incluyendo lluvias, cultivos previos, labranzas, fuentes y momentos de fertilización (Tao et al., 2018). Los muestreos guiados por imágenes satelitales son una herramienta útil para el proceso

de evaluación de la oferta de N o el estado de nutrición nitrogenada de las plantas (Tao et al., 2018).

En la actualidad también se observa la incorporación de herramientas de inteligencia artificial para desarrollar modelos de decisión de prácticas agrícolas de precisión. Estas procuran interpretar integralmente información para la toma anticipada de decisiones tales como determinar la estructura del cultivo a implantar como la predicción de su productividad o la identificación de sectores representativos para la caracterización del ambiente productivo. Las técnicas de inteligencia artificial combinan acciones imitando procesos inductivos y deductivos del pensamiento humano empleando complejos circuitos y programas alimentados con abundantes datos. Esta metodología no emplea funciones específicas sino entrenamientos desarrollando algoritmos para reconocer patrones permitiendo, por ejemplo, conocer cómo se desarrollan los cultivos y hacer predicciones a partir de estas. La incorporación de métodos de inteligencia artificial para el procesado integral de datos de cultivos junto con sistemas de monitoreo dirigidos contribuiría también para incrementar la calidad (composición nutricional) de los granos con ajustes en la fuente y dosis de N a aplicar (Arai et al., 2018).

## Las tres D de la fertilización

Los modelos aplicados en la agricultura moderna integran prácticas mejoradas de manejo de la fertilización y procuran establecer estrategias para el uso responsable de nutrientes tal de implementar fuente y dosis de fertilizantes en el lugar y en el momento correcto (Grasso y DíazZorita, 2018b). Para tal propósito convergen en combinar tres pilares de conocimiento atendiendo a caracterizar, para cada cultivo y unidad de manejo predeterminada, la demanda de nutrientes (requerimientos nutricionales), su disponibilidad (oferta) y la decisión (aplicación) operativa. En la Tabla 2 se resumen algunos de los diversos elementos que frecuentemente se emplean para la caracterización de estos pilares de planificación y de su interpretación integral convergen diversas aproximaciones de fertilización.

Surgen así complejos y variados modelos de recomendación donde se conjugan elementos propios de los nutrientes y cultivos que atienden a diferencias provenientes del conocimiento del sitio integrado a decisiones empresariales estratégicas. En la integración de decisiones de manejo de nutrientes se mejora la intensificación sustentable de la producción agrícola. Además, como en la planificación de otras decisiones que hacen a los resultados de los sistemas productivos, toda medida de variabilidad nos ayudará a prepararnos mejor para resultados diferentes al “esperado” o “promedio” (Berger, 2019).

### ¿Recetas para la fertilización perfecta?: consideraciones finales

Las recetas se emplean en diversas actividades profesionales y se definen como notas únicas para el despacho de un determinado principio activo o formulación y su dosificación. También pueden ser reconocidas por la descripción de una fórmula de un producto incluyendo sus ingredientes, cantidades, modos de elaboración e incluso de aplicación o administración. En el caso de planteos de fertilización, la consideración de una receta perfecta tal de alcanzar todos los componentes deseables conduciendo a una única recomendación es contraria a la complejidad de los procesos en los que los nutrientes aplicados intervienen.

Las actuales decisiones actuales de aplicación de fertilizantes, mayormente sustentados en la reiteración de prácticas con limitada consideración de información complementaria, mejoran al reconocer (con datos) los tres pilares de organización a considerar en los planes de fertilización: Demanda – Disponibilidad - Decisión

(Tabla 2). Sin embargo, dada la dinámica en las relaciones entre estos pilares, las recomendaciones de manejo de fertilización pueden considerarse también como un pronóstico de patrones futuros en la demanda y disponibilidad de nutrientes en asociación con las opciones de implementación. Por lo tanto, tal como en el caso de la elaboración de pronósticos estacionales del clima, en la medida que se recolecten y procesen abundantes datos de caracterización y al usar variados modelos de interpretación de las necesidades de fertilización, se podrían alcanzar recomendaciones de implementación mejoradas. En este sentido las herramientas actuales de recopilación, almacenamiento y procesamiento de datos abundantes nos aleja aún más de la posibilidad de establecer una única aproximación (“receta”) para la implementación de la fertilización. Esto nos desafía a la continua incorporación y caracterización de información productiva y de prospectiva para perfeccionar no solo la determinación de la mejor opción biológica para el manejo de la nutrición sino también su integración con la estrategia propia de cada empresa y condición productiva.

Dado que en la región pampeana encontramos sistemas productivos diversos y complejos definidos según condiciones de sitio, técnicas y empresariales, la simplificación de procesos complejos es de utilidad para su implementación siempre que se reconozca la variabilidad esperable de resultados y riesgos asociados a tal decisión alejándonos así de la posibilidad de elaborar una receta.

**Tabla 2.** Los pilares de planificación para el manejo de la nutrición de cultivos, descripción y algunos elementos frecuentemente considerados para su caracterización.

	Demanda	Disponibilidad	Decisión
Descripción	Cuantificación de necesidades totales de nutrientes y su distribución durante el cultivo.	Interpretación de indicadores de oferta esperada de nutrientes y de estado nutricional de cultivos en relación con condiciones de sitio	Organización de la ejecución de la práctica en relación con condiciones de sitio.
Elementos	Propósitos empresariales. Prácticas históricas propias, regionales. Expectativas productivas (frecuentes o modas, medias, máximas, etc.). Modelos de simulación agronómicos.	Análisis de suelos. Análisis foliares y de tejidos. Imágenes del cultivo. Pronósticos meteorológicos	Fuentes de nutrientes. Dosis de fertilizante. Ubicación del fertilizante. Momento de fertilización.

## Bibliografía

- Arai, K., O. Shigetomi y Y. Miura. 2018. Artificial intelligence-based fertilizer control for improvement of rice quality and harvest amount. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 9: 61-67.
- Berger, A. 2019. Medir la variabilidad del resultado para tomar mejores decisiones. *Cultivar Decisiones* 207, 5 pp.
- Caviglia, O.P., R.H. Rizzalli, J.P. Monzón, F.O. García, R.J.M. Melchiori, J.J. Martínez, A. Cerrudo, A. Irigoyen, P.A. Barbieri, N.V. Van Opstal y F.H. Andrade. 2019. Improving resource productivity at a crop sequence level. *Field Crops Research* 235: 129-141
- Díaz-Zorita M. y A.A. Grasso. 2016. Fertilización intensificada de planteos agrícolas. XXIV Congreso Anual AAPRESID, Rosario, Santa Fe (Argentina), en pdf.
- Díaz-Zorita, M. 2017. Modelos integrados de recomendación de fertilización en la región pampeana. En: IPNI-Fertilizar AC, Resúmenes de conferencias y posters del Simposio Fertilidad 2017 "Más allá de la próxima cosecha", Rosario (SF, Argentina), pp. 108-113.
- Fertilizar AC. 2019. Detalle de consumo de fertilizantes - Extensivos. [http://www.fertilizar.org.ar/?page\\_id=468](http://www.fertilizar.org.ar/?page_id=468). (fecha de consulta: 14 de marzo del 2019).
- García F.O. e I. Ciampitti. 2010. Enfoques alternativos para el diagnóstico de fertilidad de suelos: El enfoque "tradicional". Actas CD XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACS. Rosario (Santa Fe, Argentina), en CD.
- Grasso, A.A. 2019. brechas en la producción de secuencias de cultivos en la región pampeana según estrategias de fertilización. Simposio Fertilidad 2019, Rosario (SF, Argentina).
- Grasso, A.A. y M. Díaz-Zorita. 2018a. Valorización inicial de estrategias de fertilización en la región pampeana. Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Tucumán (Argentina), Comisión 3: 173-177.
- Grasso, A.A. y M. Díaz-Zorita. 2018b. Manual de buenas prácticas de manejo de fertilización. Fertilizar Asociación Civil, C.A. de Buenos Aires (Argentina), 52 pp.
- Gutiérrez Boem, F.A. 2013. Fertilización del cultivo de soja. En: Alvarez, R.; P. Prystupa; M. B. Rodríguez y C. R. Alvarez. Fertilización de cultivos y pasturas, Editorial FAUBA, Buenos Aires (Argentina), 213-240.
- Leikam, D.; G. Randall y A. Mallarino. 2010. Are current soil test-based phosphorus and potassium fertilizer recommendations adequate? *Crops and Soils* 43: 27-32.
- Morris, T.F.; T.S. Murrell; D.B. Beegle, J.J. Camberato, R.B. Ferguson, J.H. Grove; Q. Ketterings; P.M. Kyveryga; C.A. M. Laboski; J.M. McGrath; J.J. Mesinger; J. Melkonian; B.N. Moebius-Clune, E.D. Nafziger; D. Osmond; J. E. Sawyer; P.C. Charf; W. Smith; J.T. Spargo, H.M. van Es y H. Yang. 2018. Strength and limitation of nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement. *Agr. J.* 110: 1-37
- Novoa, R. y R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and soil* 58: 177-201.
- Peralta, N.R.; J.A. Di Matteo, J.M. Ferreyra; R. Mechiori; H. Sainz Rozas y A. Bianchini. 2018. Un nuevo enfoque de la teledetección para la predicción del rendimiento del maíz y manejo de nitrógeno. Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Tucumán (Argentina), Comisión 3: 267-270.
- Perticari, A. y C. F. Piccinetti. 2019. Inoculantes Microbianos en la Agricultura Argentina y aportes de la Fijación Biológica de Nitrógeno en leguminosas cultivadas. RELAR, Puerto Varas (Chile)
- Rubio, G., H. Rimski-Korsakov y R.S. Lavado. 1999. Uptake of soil mineral phosphorus and fertilizer 32-P in waterlogging tolerant plants. *Current Topics in Plant Physiology* 19: 338-340.
- Sainz Rozas, H. R., M. Eyherabide, H.E. Echeverría, P.A. Barbieri, H.P. Angelini, G.E. Larrea, G.N. Ferraris, y M.R. Barraco. 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? En Simposio Fertilidad 2013. Mayo de 2013. Rosario, Santa Fé. Argentina
- Stewart, W.M, D. W. Dibb, A. E. Johnston y T. J. Smyth. 2005. The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production *Ag. J.* 97:1-6.
- Tao, H., T.F. Morris; P. Kyveryga y J. McGuire. 2018. Factors affecting nitrogen availability and variability in corn fields. *Ag. J.* 110: 1974-1986. ◀



## Relevamiento y determinación de propiedades químicas en suelos de aptitud agrícola de la región pampeana

Hernán Sainz Rozas, Mercedes Eyherabide, Gastón Larrea, Nicolás Martínez Cuesta, Hernán Angelini, Nahuel Reussi Calvo y Nicolás Wyngaard

Unidad Integrada INTA-FCA, Balcarce, Buenos Aires

[sainzrozas.hernan@inta.gob.ar](mailto:sainzrozas.hernan@inta.gob.ar)

### Introducción

La producción de granos se ha incrementado sustancialmente durante los últimos años en la Argentina, pasando de aproximadamente 39 millones de toneladas en 1993 a casi 124 millones de toneladas en la campaña 2016/17. Si bien los consumos de nitrógeno (N) y fósforo (P) se incrementaron en sincronía con el aumento de la producción, la reposición de P y de otros nutrientes siguen siendo inferiores a su extracción en los granos. Solo el 53%, 27%, 1.5% y 0.21% del fósforo (P), calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg) extraídos, respectivamente, se repusieron mediante fertilización desde 1993 hasta 2016 (García, 2017).

Paralelamente, la intensificación de la actividad agrícola y la falta de rotaciones con pasturas han producido una notable disminución de los niveles de materia orgánica (MO) de los suelos de la Región Pampeana. De esta forma, dependiendo del tipo de suelo y textura, hoy en día solo se presenta el 50% del nivel original de MO (Sainz Rozas et al., 2013). El agotamiento de la MO explicaría la respuesta generalizada al agregado de N (Echeverría y Sainz Rozas, 2015), y en menor medida a azufre (S) (Reussi Calvo et al., 2009). Además, si continúa la tendencia declinante de los contenidos de MO es probable que se aceleren los procesos erosivos.

La escasa reposición de los cationes básicos podría afectar directamente el rendimiento de los cultivos e indirectamente a través de la alteración de otras propiedades físico-químicas del suelo relacionadas con el estado de salud de los suelos (materia orgánica, actividad microbiana, densidad aparente, estabilidad de agregados, pH). Durante un relevamiento realizado en 2005 y 2006 y 2010/11 se reportó que los valores más bajos de pH (desde 5,5 a 5,8) se determinaron en la zona norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe (Sainz Rozas y Echeverría, 2011). Si bien estos valores de pH determinados no son considerados limitantes para la mayoría de los cultivos (Vázquez

y Pagani, 2015), es de esperar que de continuar esta tendencia sea necesario la aplicación de correctores de acidez en áreas críticas y en cultivos sensibles como la soja. Por otra parte, el K intercambiable ( $K_i$ ) fue el nutriente que mostró mayor caída respecto de los suelos prístinos (39%, 22% y 19% para K, Ca y Mg, respectivamente). Los menores niveles de  $K_i$  se ubicaron al noreste de la región pampeana, mientras que los menores de Ca y Mg al nor-noroeste de la misma (Sainz Rozas et al., 2013). Por lo tanto, es necesario contar con información actualizada de los contenidos de bases intercambiables y de la acidez del suelo, y de su distribución geográfica.

Las deficiencias de micronutrientes (Mn, Fe, Cu y Zn) son menos frecuentes que para el caso de N, P y S en la región pampeana. Sin embargo, el incremento del uso de fertilizantes nitrogenados puede incrementar la exportación de los mismos, tanto por un aumento de su concentración en los granos como por el aumento de los rendimientos (Goldman et al., 2002). Los datos de un relevamiento realizado en 2010/11 en suelos de la región pampeana indican que el micronutriente que mostró la mayor caída por la agricultura fue el Zn (70% menos respecto de la condición prístina). Las áreas de mayores deficiencias se ubicaron al nor-noroeste y suroeste de la región pampeana (Sainz Rozas et al., 2013). Desde este muestreo a la fecha los rendimientos de los cultivos se han incrementado y con ello la extracción de micronutrientes, lo que hace necesario contar con información actualizada de su disponibilidad en suelos de la región pampeana Argentina.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) determinar los niveles actuales de MO, pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y de algunos nutrientes (Ca, Mg, K, Zn, Mn, Cu y Fe) en los mismos lotes muestreados en 2011; 2) determinar el cambio de dichas variables entre 2011 y 2018; y 3) elaborar mapas con los resultados actuales y compararlos con aquellos del muestreo realizado en 2011.

## Materiales y métodos

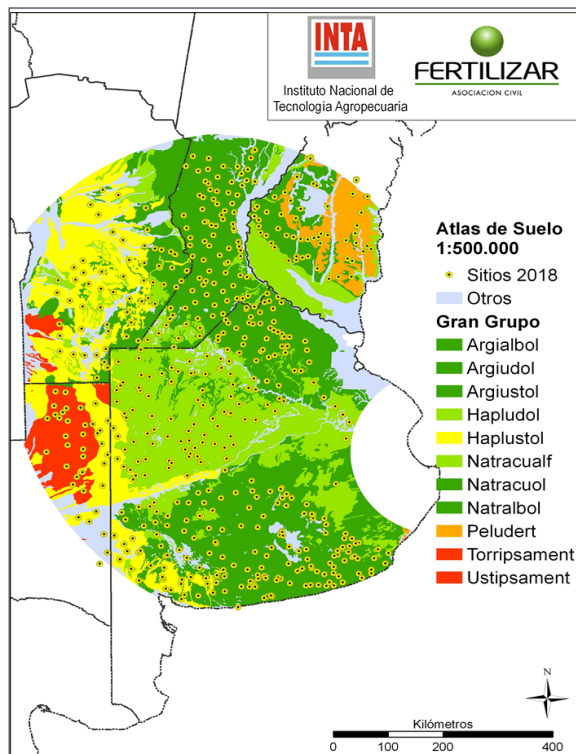
Entre julio y septiembre de 2018 se tomaron un total de 570 muestras de suelo de la región pampeana Argentina (latitud: 33°O 23°S a 38°O 47°S, longitud: 57°O 36°O a 63°O 23°O), que abarca las provincias de Buenos Aires, Santa Fe, La Pampa, Entre Ríos y Córdoba. La **Figura 1** describe los sitios de muestreo y los tipos de suelo predominantes. Casi todos los sitios muestreados (95%) corresponden a los muestreados en 2011. En cada sitio, se tomó una muestra de suelo compuesta (30 sub-muestras por sitio) de la capa de suelo de 0 a 20 cm usando un muestreador de acero inoxidable. Las muestras se secaron al aire, se mezclaron, se tamizaron para pasar una malla de 2 mm y se almacenaron en recipientes de plástico.

Los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio del Grupo de Relaciones Suelo-Planta del INTA-FCA Balcarce a partir de muestras secadas a 30°C y tamizadas por 2 mm. Se determinó pH actual (relación suelo:agua de 1:2.5), P-Bray I (Bray and Kurtz, 1945), contenido de materia orgánica (MO) (Walkley y Black, 1934), CIC y cationes intercambiables extraídos con acetato de amonio 1N a pH 7 (Chapman, 1965; Schollenberger y Simon, 1945). Para la determinación de CIC, K, Ca intercambiable (Ca<sub>i</sub>) y Mg intercambiable (Mg<sub>i</sub>) se pesaron 2 g de suelo y se lo dejó durante la noche con 20 ml de acetato de amonio 1N (pH=7). La suspensión se filtró y el extracto se usó para determinar los cationes básicos mediante espectroscopia de emisión de llama (para el caso del K) y por absorción atómica para los demás cationes (Shimadzu AA-6200). La disponibilidad de K<sub>i</sub>, Ca<sub>i</sub> y Mg<sub>i</sub> se expresó en mg kg<sup>-1</sup> de suelo y meq 100 g<sup>-1</sup> de suelo. Las relaciones K<sub>i</sub> / (Ca<sub>i</sub> + Mg<sub>i</sub>) y Ca<sub>i</sub> / Mg<sub>i</sub> se basaron en datos expresados como meq 100 g<sup>-1</sup>. Luego del primer filtrado el suelo se lavó dos veces con 20 ml de etanol al 96%. Posteriormente, el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en el suelo se desplazó utilizando 40 ml de NaCl al 10% y se cuantificó mediante micro-distilación por arrastre de vapor con posterior titulación con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,04 N. Los meq de ácido consumidos son iguales a los meq de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> presentes en la muestra, valor que representa la CIC del suelo. Para la determinación de micronutrientes se siguió la técnica propuesta por Lindsay y Norvell (1978). Brevemente, se colocaron 10 g de suelo en un matraz cónico de 125-ml junto con 20 ml del extractante DTPA-TEA solución (pH = 7,3) y tras

agitar durante 2 h la suspensión se filtró a través de un Whatman no. 42 papel de filtro (Melanin Corp., Mobile, AL). Los filtrados fueron analizados utilizando espectrofotometría de absorción atómica (Modelo AA-600, Shimadzu Co., Kyoto, Japón).

Se realizó un análisis de conglomerados (AC) para agrupar suelos con características edáficas similares. Los Clusters se presentan en la **Figura 2**. Para cada Cluster, variable y fecha de muestreo (2011 o 2018), se compararon los valores medios de los suelos prístinos y agrícolas. El paquete estadístico R Commander versión 2.5-2. (Fox, 2017) se utilizó para todas las determinaciones estadísticas.

Los mapas se realizaron mediante el programa ESRI ArcMap con el valor de cada variable edáfica asociado a su posición geográfica. El método de interpolación utilizado fue el que mejor se ajustó al comportamiento de la semivarianza. Para que los resultados sean comparables, los rangos de disponibilidad utilizados en los mapas fueron los mismos que en el muestreo realizado en 2011.



**Figura 1.** Mapa indicando los sitios de muestreos y los principales grandes Clusters de suelos.

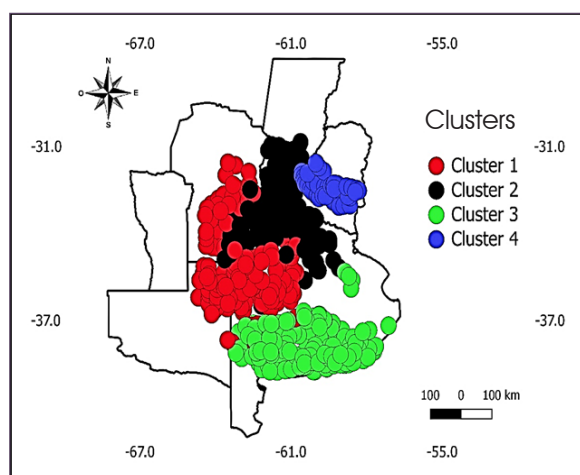
## Resultados y discusión

### Materia orgánica

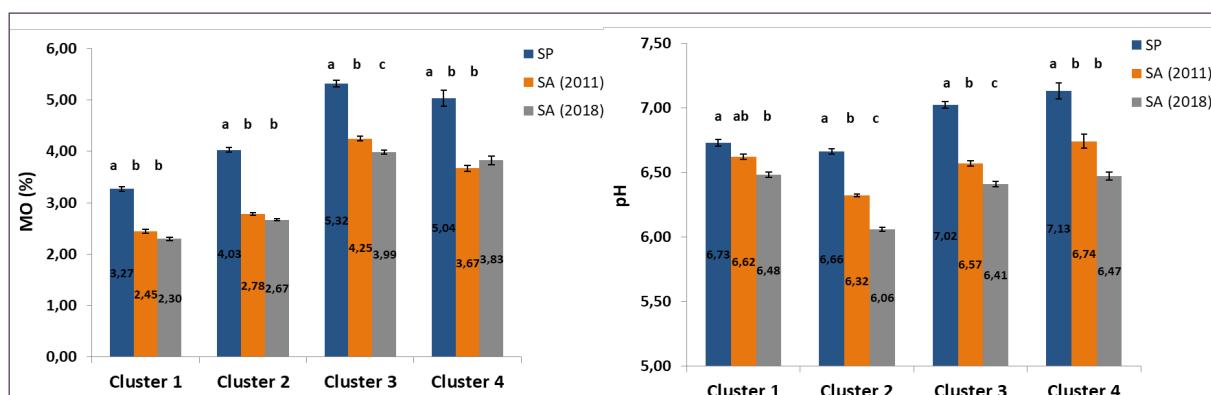
Excepto en el Cluster 3 (sureste y suroeste de la provincia de Buenos Aires), la magnitud de los valores de la MO no cambió significativamente entre 2011 y 2018. Sin embargo, los suelos prístinos siempre presentaron mayor MO que los suelos agrícolas (**Figuras 3 y 4**). El hecho de que la MO no se modificó entre 2011 y 2018 en la región pampeana norte (Clusters 1, 2 y 4) sugiere que se ha alcanzado un nuevo equilibrio entre las pérdidas y las ganancias de C. Por otro lado, la disminución de la MO en el Cluster 3 entre 2018 y 2011 sugiere que no se ha alcanzado el equilibrio entre las pérdidas y las ganancias de C en esta área. Otra causa puede deberse al alto

valor de erodabilidad de los suelos en esta área (Piscitelli et al., 2010), que junto con el aumento de escorrentía determinado en los últimos años puede haber producido un aumento del proceso de erosión hídrica (Puricelli, 2019, comunicación personal). La magnitud de la reducción de la MO entre los suelos prístinos y agrícolas varió de 26% a 34% entre Clusters. En términos de concentración de nutrientes, esta disminución de la MO representaría una pérdida de 1176 a 1668 kg/ha para N orgánico y de 98 a 139 kg/ha para azufre orgánico. Estos resultados explican la respuesta generalizada al N y la respuesta frecuente y creciente a la fertilización con S en la región pampeana.

El patrón de MO fue el mismo en suelos prístinos y agrícolas, esto es: la MO disminuyó desde el sureste hacia el noroeste de Pampas (**Figura 4**). A escala regional, el nivel de MO en suelos prístinos está determinado por el clima, que regula la magnitud de las entradas de carbono (biomasa) y las salidas (respiración microbiana) en el sistema del suelo (Álvarez y Steinbach, 2006). El menor contenido de MO en el área occidental que en el este, está determinado por una menor precipitación anual, mientras que la disminución de norte a sur es una consecuencia de la menor temperatura. Otro factor que puede explicar el gradiente de MO de este a oeste es la textura, ya que las arcillas del suelo (más abundantes en el área este) protegen a la MO de la descomposición microbiana, favoreciendo la acumulación de MOS (Six et al., 2002).



**Figura 2.** Clusters o subregiones con suelos de características similares surgidos del análisis de conglomerados.



**Figura 3.** Análisis estadístico de la media de MO y pH para cada Cluster o subregión. SP: suelos prístinos; SA (2011): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2011; SA (2018): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2018. Dentro de un Cluster letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

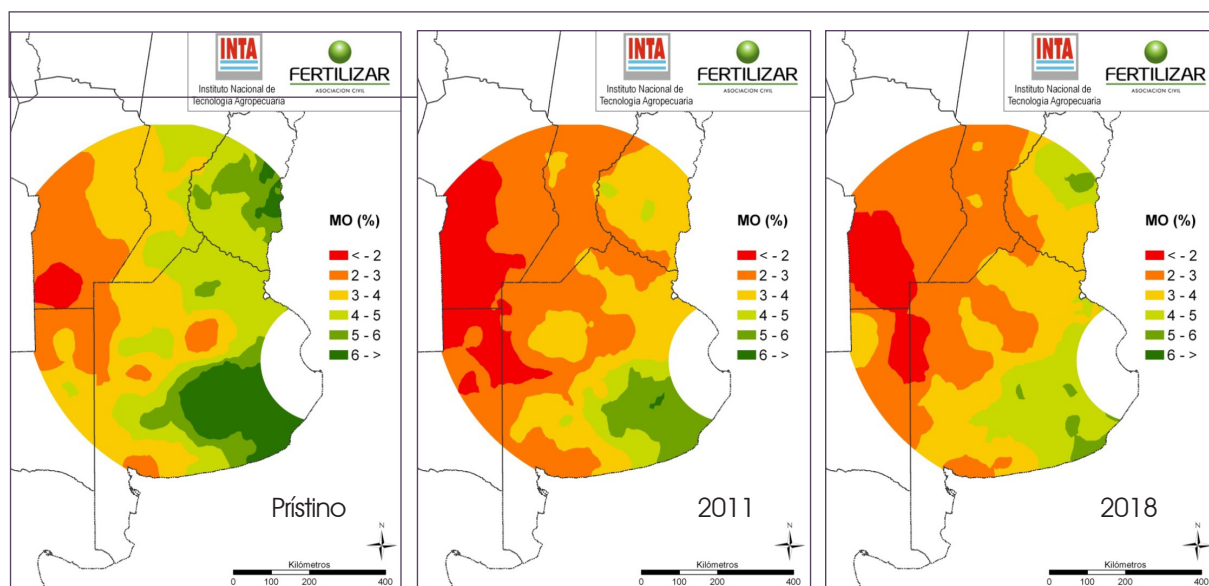
## Acidez del suelo

El pH del suelo tendió a disminuir con el tiempo, ya que la mayoría de los sitios presentaron diferencias significativas entre los suelos prístinos y los suelos agrícolas muestreados en 2011 o 2018. La mayor acidificación se observó en los Clusters 2, 3 y 4 (Figuras 3 y 5), y puede ser explicado por: i) una mayor exportación de cationes básicos debidos a los mayores rendimientos de cultivos y a la frecuencia del monocultivo de soja, y ii) la presencia de horizontes texturales B, que determinan que la extracción de bases se limita principalmente a las contenidas en el horizonte superficial (Correndo et al., 2011). Otros factores que pueden explicar la mayor acidificación, principalmente en el Cluster 2, es la menor capacidad buffer de los suelos por su bajo contenido de MO, una mayor historia de uso de fertilizantes con N y la mayor extracción de cationes básicos con respecto a los suelos de otras áreas (Cruzate y Casas, 2012). En el muestreo del 2011, un 30% de los suelos muestreados mostró valores de pH por debajo de 6,26, mientras que, en 2018, un 44% de los suelos mostraron valores de pH por debajo de 6,17 (Figura 6). Un estudio de suelos realizado en 2005-2006 en la región pampeana ( $n = 30000$ ) determinó que el pH en los suelos agrícolas oscilaba entre 6 y 7,5 (Sainz Rozas et

al., 2011). La comparación de estos resultados con los actuales y con los del muestreo de 2011, demuestra una tendencia decreciente en los valores de pH.

En algunas áreas del norte y este de la región pampeana Argentina, los valores de pH pueden llegar a ser limitantes para las leguminosas y para la actividad microbiana, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes. En este sentido, en suelos con contenidos similares de N en el pool orgánico lábil, Divito et al. (2011) determinaron que la cantidad de N liberada durante una incubación anaeróbica del suelo varió de 63 a 78  $\text{mg kg}^{-1}$  para valores de pH de 5.3 y 5.8, respectivamente. Además, a valores de pH inferiores a 5, la concentración de aluminio (Al) intercambiable aumentaría (Brady y Weil, 2008), el cual por hidrólisis reduciría aún más los valores de pH del suelo. Si bien las tendencias regionales sugieren que la acidez podría limitar la producción de cultivos en estas áreas, la determinación del pH para evaluar una posible respuesta al encalado del suelo se debe realizar a nivel de lote.

Tanto la MO como el pH se asociaron positivamente con la CIC del suelo (Figura 7). Estos resultados están en línea con los reportados por Brady y Weil (2008) y sugieren que una mayor disminución en los niveles de pH y MO puede resultar en una mayor pérdida de cationes básicos.



**Figura 4.** Distribución de los contenidos de materia orgánica (MO) del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos prístinos (muestreados en 2011) y con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018. En 2011 y 2018 las muestras se tomaron del mismo lote.



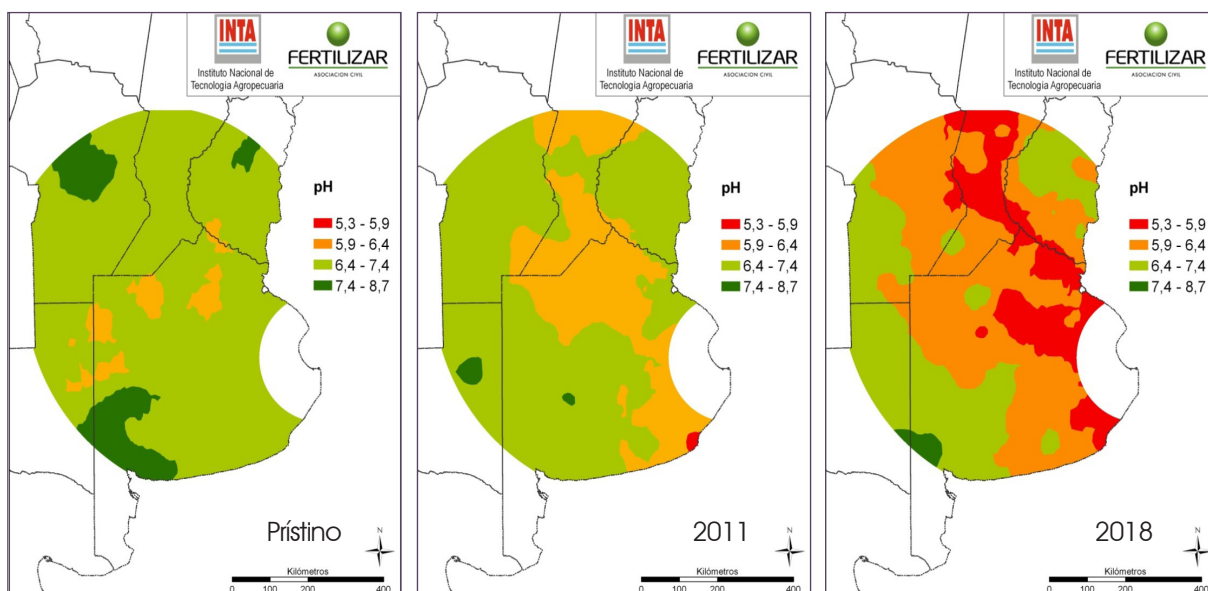


Figura 5. Distribución de valores de pH en la capa superficial (0 a 20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y suelos agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

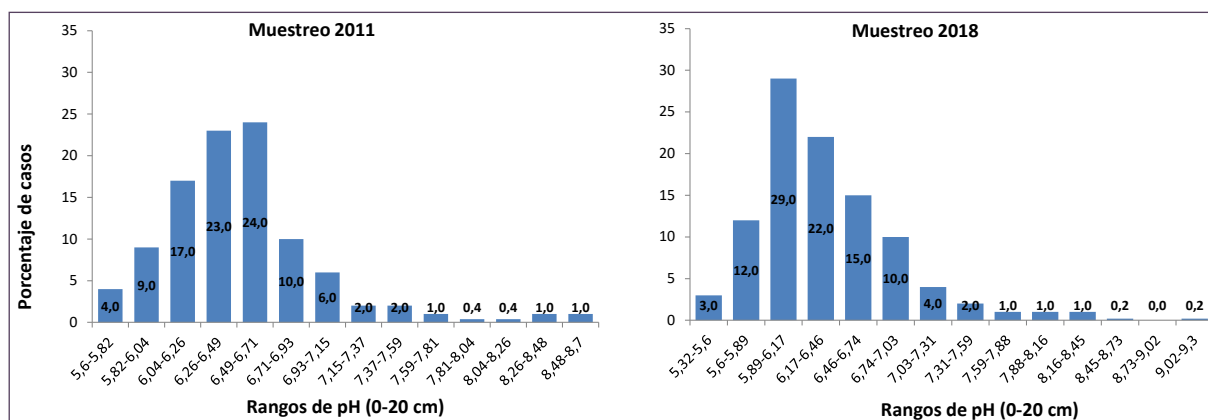


Figura 6. Distribución de valores de pH en agua (relación 1:2,5) en la capa superficial de suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

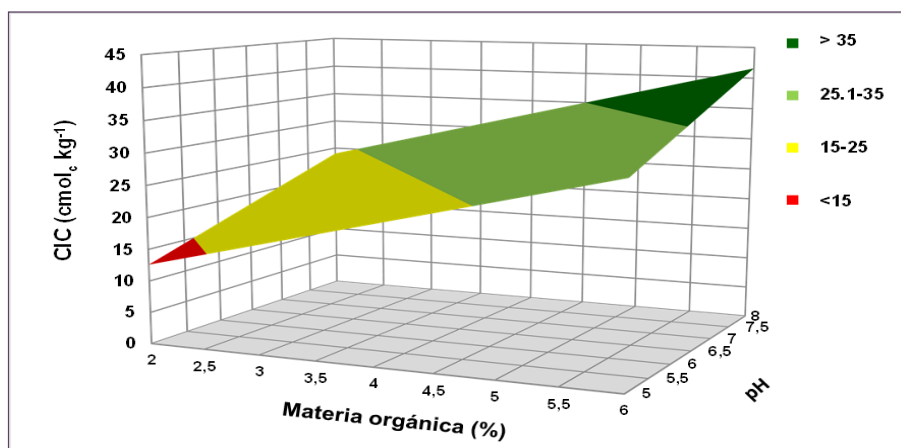
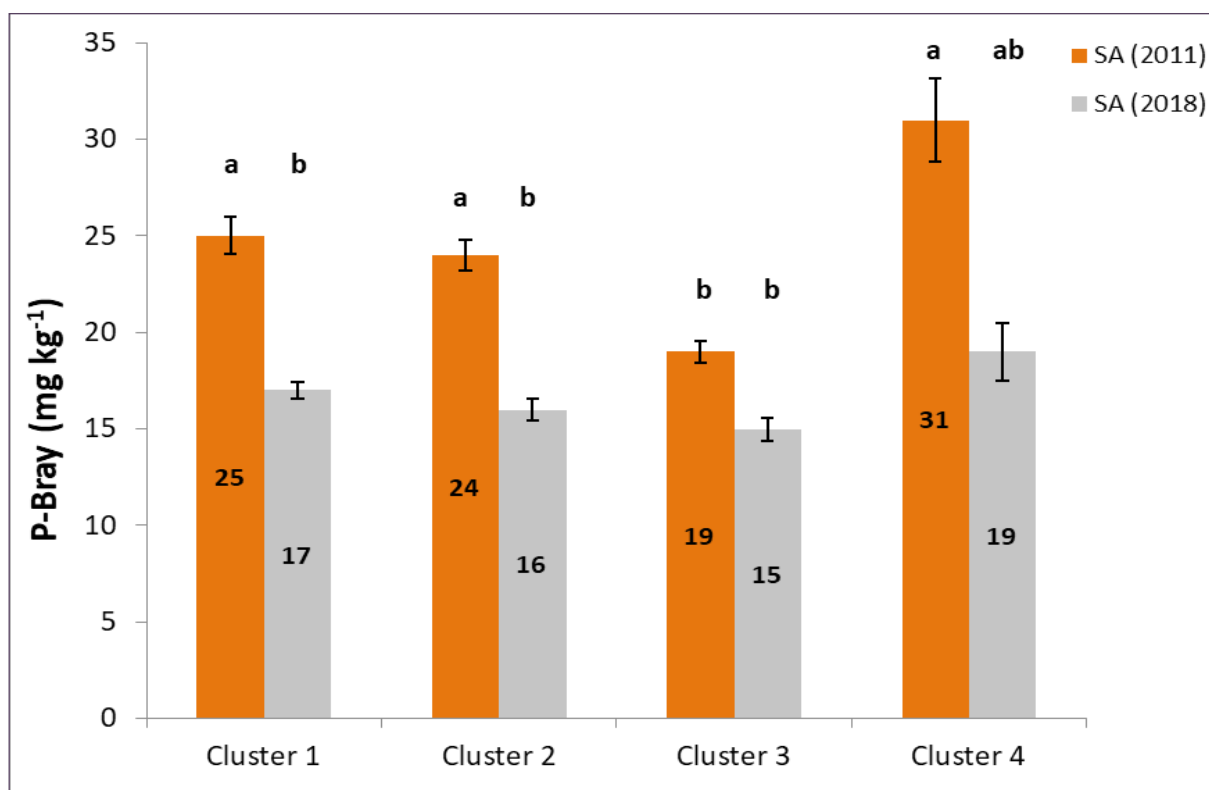


Figura 7. Capacidad de intercambio catiónico en función del contenido de MO y del pH edáfico.  $CIC = -15,2 + 4,4 * MO + 3,8 * pH$ ;  $r^2 = 0,50$ .

## Niveles de fósforo extractable

Salvo en el Cluster 3, los niveles de P extractable (P-Bray) en suelo disminuyeron significativamente entre el muestreo realizado en 2011 y 2018 (Figura 8). Como puede visualizarse en la Figura 9, el área ocupada con niveles de P-Bray superiores a  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  se achicó considerablemente entre 2011 y 2018, mientras que en el mismo período creció el área ocupada con niveles de P-Bray entre  $10$  y  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  y aparecieron algunas zonas con menos de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  en el sur de Santa Fe (Figura 9). El análisis de frecuencia muestra que el porcentaje de lotes con menos de  $15,9$ - $16,5 \text{ mg kg}^{-1}$  de P-Bray pasó del 44% en 2011 al 66% en 2018 (Figura 10). Esto sugiere que los balances de P continuaron siendo negativos durante el período evaluado. Si se asume que los umbrales críticos de P-Bray para la mayoría de los cultivos oscilan de  $12$  a  $18 \text{ mg kg}^{-1}$  (García et al., 2015), estos resultados indican que el nivel actual de P-Bray en los suelos de esta vasta región podría ser limitante para la producción de los cultivos.



**Figura 8.** Análisis estadístico de la media de P-Bray para cada cluster o subregión. SA (2011): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2011; SA (2018): suelos con prolongada historia agrícolas muestreados en 2018. Dentro de un cluster letras diferentes indican diferencias significativas al 5% de probabilidad.

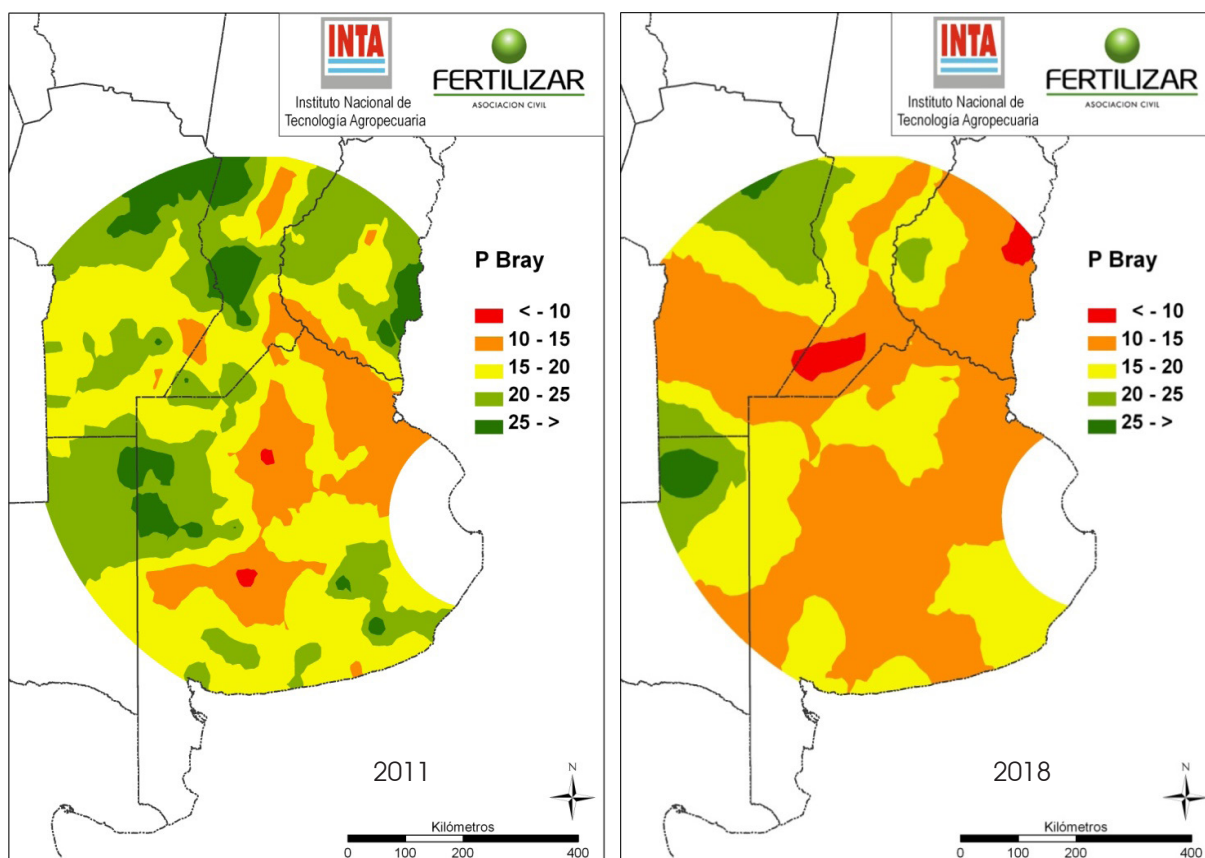


Figura 9. Distribución de los niveles de P-Bray del horizonte superficial (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

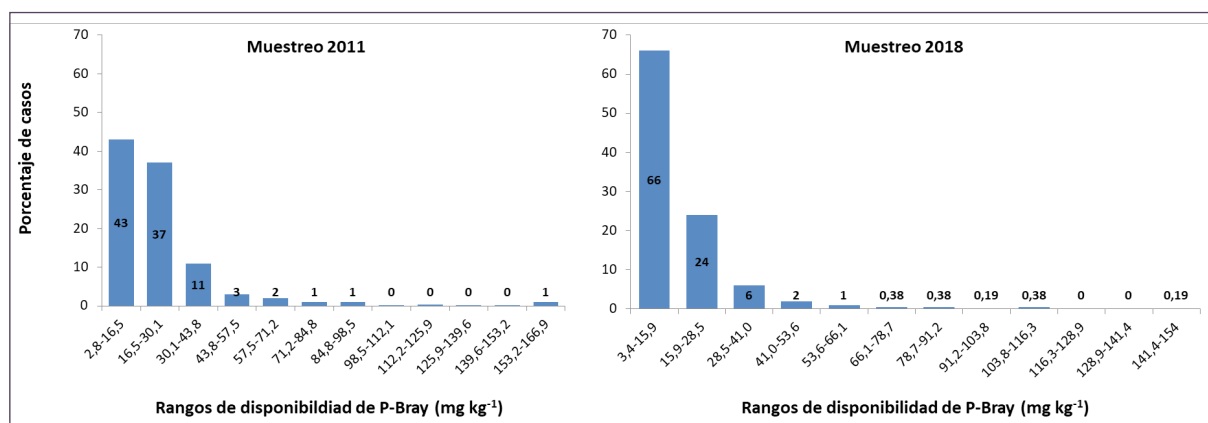


Figura 10. Frecuencia de rangos de valores de P-Bray (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

## Bases intercambiables

Los valores de  $\text{Ca}_i$  determinados en el último muestreo estuvieron en el rango medio a alto (de 1650 a 3939  $\text{mg kg}^{-1}$ ) en la mayoría de los Clusters, y por encima de los umbrales críticos informados por algunos autores (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). Sin embargo, se observó una tendencia decreciente (-3.9% a -16%) desde 2011 hasta 2018, la cual fue significativa en el Cluster 2. Los valores de  $\text{Ca}_i$  determinados en 2018 fueron 19% a 29% más bajos que los observados en suelos prístinos, correspondiendo la mayor disminución al Cluster 2 (Figura 11). La gran disminución de  $\text{Ca}_i$  en este Cluster podría ser una consecuencia de la alta frecuencia de soja hasta 2015 en la rotación de cultivos, ya que la extracción de Ca por esta soja es de cinco a seis veces mayor que la del trigo y el maíz (Vázquez y Pagani, 2015).

Los valores de  $\text{Ca}_i$  más bajos se observaron en los Clusters 1 y 2 (noroeste y norte de Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe; Figura 12). En estas áreas, hay informes sobre la respuesta de la soja y la alfalfa a enmiendas calcáreas (Gambaudo y Fontanetto, 2011; Vázquez et al., 2010; Vázquez, 2011). Si la tendencia  $\text{Ca}_i$  observada entre 2011 y 2018 continúa, las deficiencias de Ca podrían generalizarse en el Cluster 2 en aproximadamente 16 años (Tabla 1). Sin embargo, si los valores de MO y pH siguen disminuyendo junto con la CIC, el aumento de las pérdidas de Ca por lixiviación podría acelerarse y, por lo tanto, se podría acortar el tiempo hasta que Ca se vuelva limitante para los cultivos.

Al contrario de lo que se observó para  $\text{Ca}_i$ , se determinó una disminución significativa del Mg, entre las fechas de muestreo de 2011 y 2018 en todos los Clusters. La magnitud de la disminución de Mg, respecto del 2011 osciló entre 30% y

40%, correspondiendo el mayor valor al Cluster 2, seguidos por los Clusters 1 y 4 (Figura 13). Los valores de  $\text{Mg}_i$  determinados en el último muestreo estuvieron dentro del rango considerado alto en los Clusters 3 y 4 (de 314 a 350  $\text{mg kg}^{-1}$ ), mientras que en los Clusters 1 y 2 los valores informados están por debajo de los umbrales críticos informados por algunos autores (Bundy, 2004; Vázquez y Pagani, 2015). En el muestreo de 2011, solo el 6% de los lotes evaluados presentaba valores de Mg, menores a 269  $\text{mg kg}^{-1}$ , mientras que en 2018 el 57% de los lotes evaluados presentaban valores menores a 262  $\text{mg kg}^{-1}$  (Figura 13).

Las mayores caídas determinadas en los Clusters 1 y 2 pueden estar asociadas a que estas áreas presentan los mayores rendimientos limitados por agua de soja y maíz de la región pampeana. A manera de ejemplo los rendimientos de soja y maíz oscilan de 4,1 a 4,9  $\text{t ha}^{-1}$  y de 11,6 a 13  $\text{t ha}^{-1}$ , respectivamente (Aramburu Merlos et al., 2015). Estos rendimientos se asocian a niveles de extracción aproximados de Mg en los granos de 12,3 a 14,7  $\text{kg/ha/año}$  para soja y de 17,4 a 19,5  $\text{kg/ha/año}$  para maíz. Además, el Mg es adsorbido más débilmente por los coloides del suelo que el Ca y, por consiguiente, es más susceptible de ser desplazado por el  $\text{H}^+$  y luego lixiviado cuando el suelo se acidifica (Brady y Weil, 2008). Por lo tanto, la acidificación del suelo observada en el Cluster 2 (Figura 5) también puede contribuir a explicar la mayor reducción del Mg, respecto a otros Clusters.

A nivel regional, los valores más bajos de Mg, determinados en 2018 se observaron en el Cluster 1 (sur de Córdoba) y 2 (casi toda la provincia de Santa Fe) (Figura 14). De mantenerse las tasas de disminución determinadas entre 2011 y 2018, las zonas donde primero podrían aparecer respuesta más frecuente al agregado de Mg sería la correspondiente al Cluster 2, seguida por el

**Tabla 1.** Tasa de disminución de cationes intercambiables entre 2011 y 2018 (TD) y años hasta alcanzar el umbral de deficiencia (YD) para los distintos Cluster y/o subregiones de la región pampeana Argentina.

	Nutrientes					
	Calcio		Magnesio		Potasio	
	TD $\text{mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$	YD Años	TD $\text{mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$	YD Años	TD $\text{mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$	YD Años
Cluster 1	18	36	17	8	12	36
Cluster 2	48	16	20	5	13	17
Cluster 3	17	112	19	11	15	32
Cluster 4	81	36	25	10	17	4



Cluster 1 (Figuras 11 y 14; Tabla 1). No obstante, de continuar la tendencia decreciente de los contenidos de MO y del pH de los suelos, el tiempo para alcanzar el umbral crítico podría ser menor debido a que las pérdidas por lavado podrían incrementarse como consecuencia de una disminución de la CIC (Figura 7).

Los valores de  $K_i$  estuvieron dentro del rango alto a muy alto en la mayoría de los Clusters (de 285 a 682 mg kg<sup>-1</sup>) y estuvieron por encima de los umbrales críticos informados por algunos autores (Barbazán et al., 2011; Barbagelata y Mallarino, 2012). Como en el caso del Mg, la disminución de  $K_i$  entre 2011 y 2018 fue significativa en todos los Clusters y osciló entre el 12% y el 30%, con las mayores reducciones observadas en los Clusters 2 y 4 (Figura 11). En 2011, solo el 7% de los lotes muestreados tuvieron valores de  $K_i$  menores a 310 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que en 2018 el 13% de los lotes mostraron valores menores a 262 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 15), el cual es levemente superior al umbral crítico informado por Barbagelata y Mallarino (2012).

Como se indicó para Ca y Mg, los Clusters 2 y 4 se caracterizan por la alta frecuencia de la soja en las rotaciones y por presentar suelos con un horizonte B textural, que limita el crecimiento de las raíces y la absorción de nutrientes desde ese horizonte. Por lo tanto, en estas subregiones, la absorción de K por los cultivos se limitaría al horizonte A, aumentando la tasa de extracción (Correndo et al., 2011). A manera de ejemplo y para rendimientos potenciales en secanos en dichas zonas de 3,2 a 4,9 t ha<sup>-1</sup> para soja y de 10,4 a 13 t ha<sup>-1</sup> para maíz (Aramburu Merlos et al., 2015), los niveles de extracción de K en grano varían de 51 a 78 kg/ha y de 31 a 39 kg/ha, respectivamente.

Los valores de  $K_i$  más bajos se observaron en el Cluster 4 (provincia de Entre Ríos) y en parte del Cluster 2 (este de Santa Fe) (Figura 15 y 16). Los bajos valores de  $K_i$  registrados en el Cluster 4 también se explican por el bajo contenido de K de los materiales parentales que formaron los suelos de esta subregión (Morras, 2003; Larrea, 2019) y por la mayor tasa de pérdida de  $K_i$  causada por la agricultura (Tabla 1). De continuar esta tasa de caída, las deficiencias de K podrían generalizarse en 17 años en el Cluster 2 y en 4 años en el Cluster 4 (Tabla 1). Como se mencionó, esta tasa podría acelerarse si la MO y el pH continúan disminuyendo.

## Relación entre cationes

La relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$  aumentó significativamente de 2011 a 2018 solo en el Cluster 4 (provincia de Entre Ríos), porque la reducción del  $K_i$  tuvo una magnitud mayor que la observada para  $Ca_i$  (Figuras 11 y 17). Es importante mencionar que los suelos prístinos del Cluster 4 ya presentaron una relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$  mayor que la ideal, debido al alto contenido de Ca y al bajo contenido de K del material original que formó estos suelos (Morras, 2003; Larrea, 2019). En los Clusters 1, 2 y 3, a pesar del que el  $K_i$  se redujo de 2011 a 2018, la relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$  no se modificó, ya que las concentraciones de  $Ca_i$  y  $Mg_i$  también se redujeron durante este período, manteniendo la proporción entre los cationes (Figuras 11 y 17). Estos resultados demuestran que la relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$  no sería un indicador efectivo de deficiencias de K, ya que el valor relativo de  $K_i$  es adecuado para la producción de cultivos, mientras que en algunas regiones el valor absoluto de  $K_i$  está cerca del umbral crítico. Kopittke y Menzies (2007) también informaron que la relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$  no es efectiva como índice nutricional.

La relación  $Ca_i/Mg_i$  aumentó de 2011 a 2018 en todos los Clusters (Figura 17). Sin embargo, el valor observado todavía está ligeramente por encima del umbral crítico informado por Vázquez y Pagani (2015). Al igual que en el caso de la relación  $Ca_i+Mg_i/K_i$ , el uso de la relación  $Ca_i/Mg_i$  puede enmascarar las deficiencias de Mg (Kopittke y Menzies, 2007), ya que la relación fue adecuada en todos los Clusters, pero el  $Mg_i$  disminuyó en algunas regiones (Figura 14).

En síntesis, los suelos agrícolas de Argentina mostraron un pequeño incremento de las relaciones  $Ca_i+Mg_i/K_i$  y  $Ca_i/Mg_i$  a pesar de que se determinaron importantes disminuciones de  $K_i$  y  $Mg_i$  entre 2011 y 2018. Por lo tanto, el uso de estas relaciones para el diagnóstico de deficiencias es cuestionable.

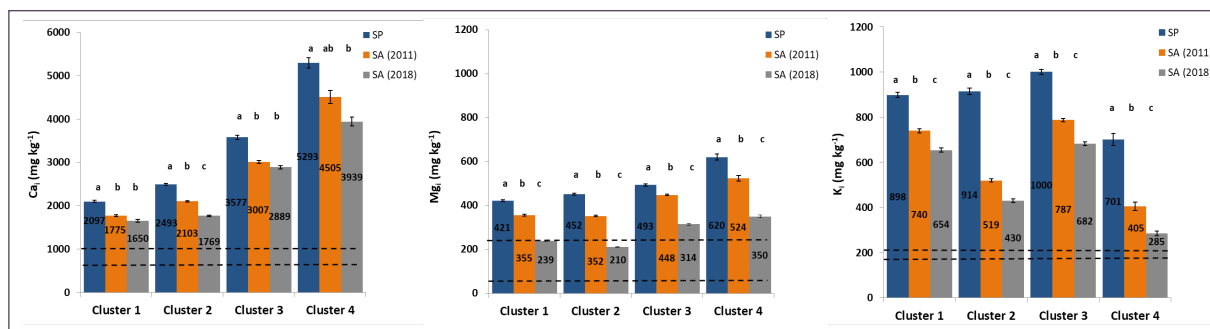


Figura 11. Contenidos de Ca, Mg y K intercambiable (Ca<sub>i</sub>, Mg<sub>i</sub> y K<sub>i</sub>) en los distintos clusters o subregiones en suelos prístinos (SP) o con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 (SA 2011) y en 2018 (SA 2018). Dentro de un cluster columnas con la misma letra no difieren significativamente al 5% de probabilidad. Las líneas horizontales punteadas indican el rango crítico para diferentes cultivos informados por Bundy (2004), Vázquez y Pagani (2015) y Barbagelata y Mallarino (2012).

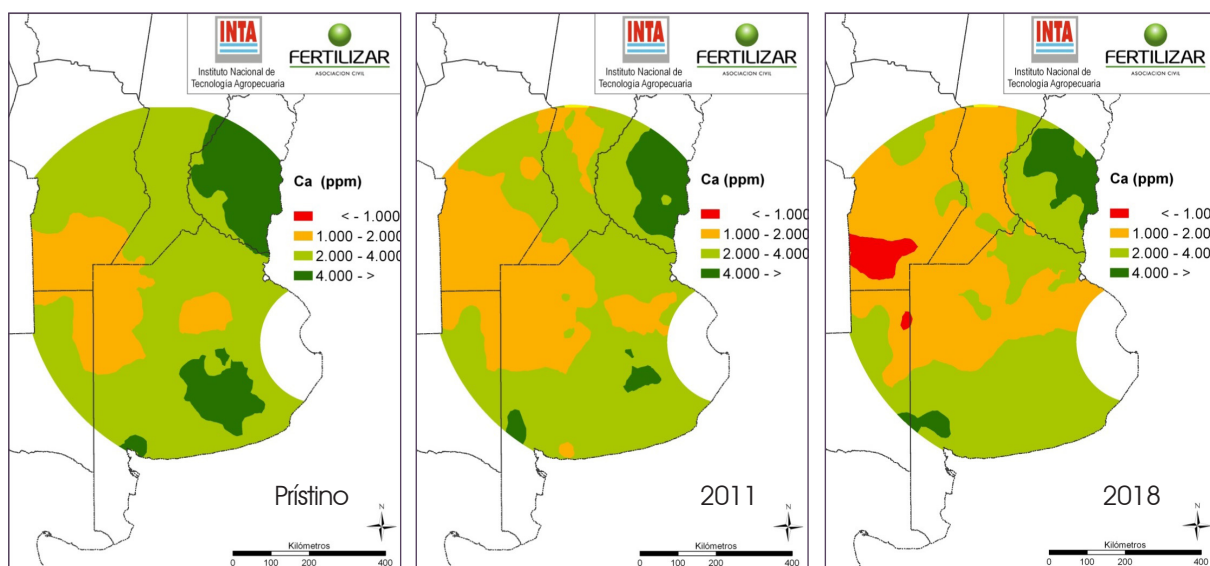


Figura 12. Distribución de los valores de calcio intercambiable (Ca<sub>i</sub>) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

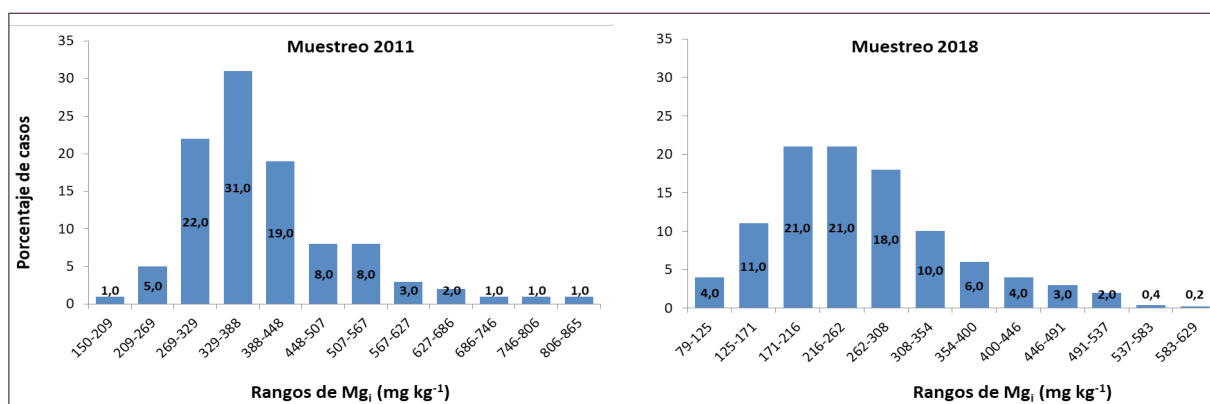


Figura 13. Frecuencia de rangos de valores de Mg intercambiable (Mg<sub>i</sub>) (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

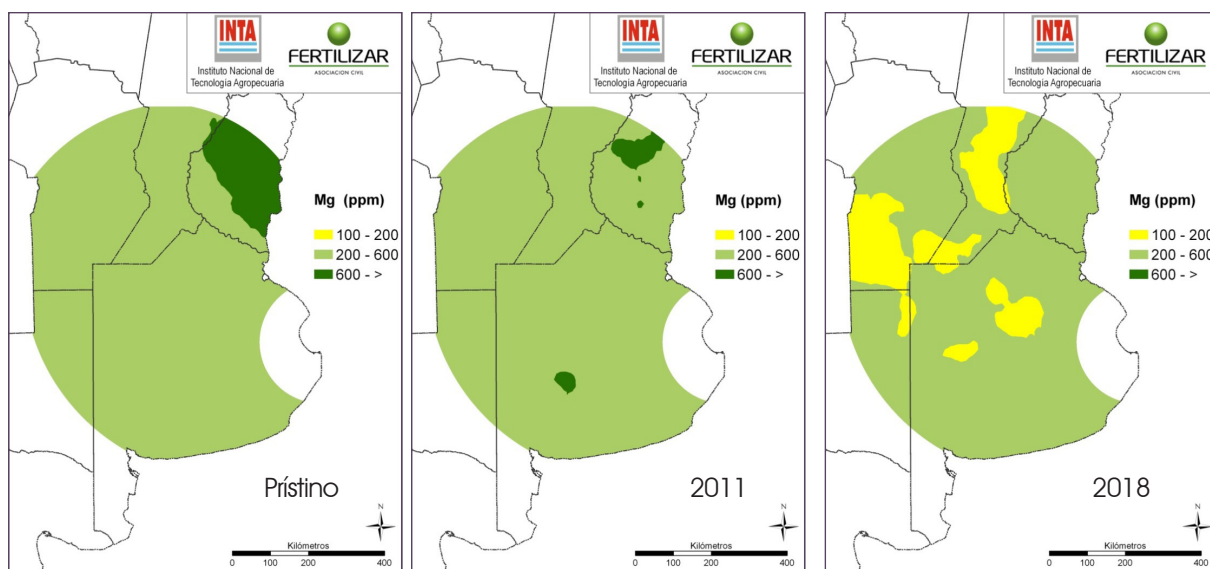


Figura 14. Distribución de los valores de magnesio intercambiable ( $Mg_i$ ) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).

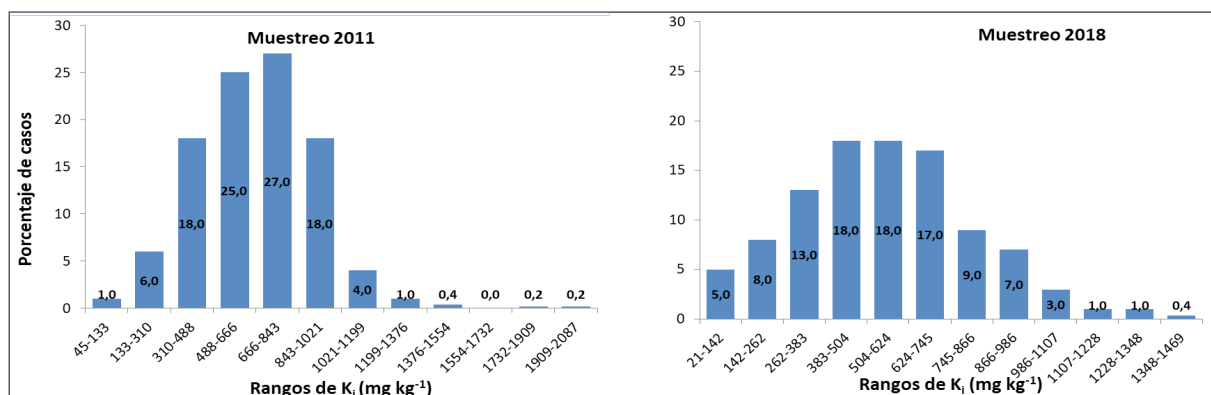


Figura 15. Frecuencia de rangos de valores de K intercambiable ( $K_i$ ) (0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

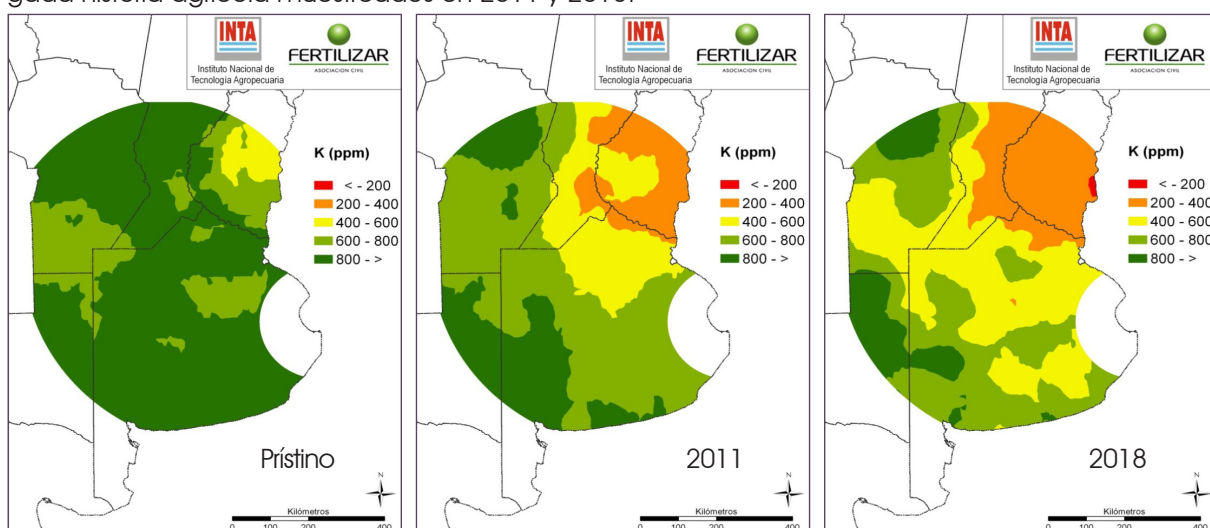
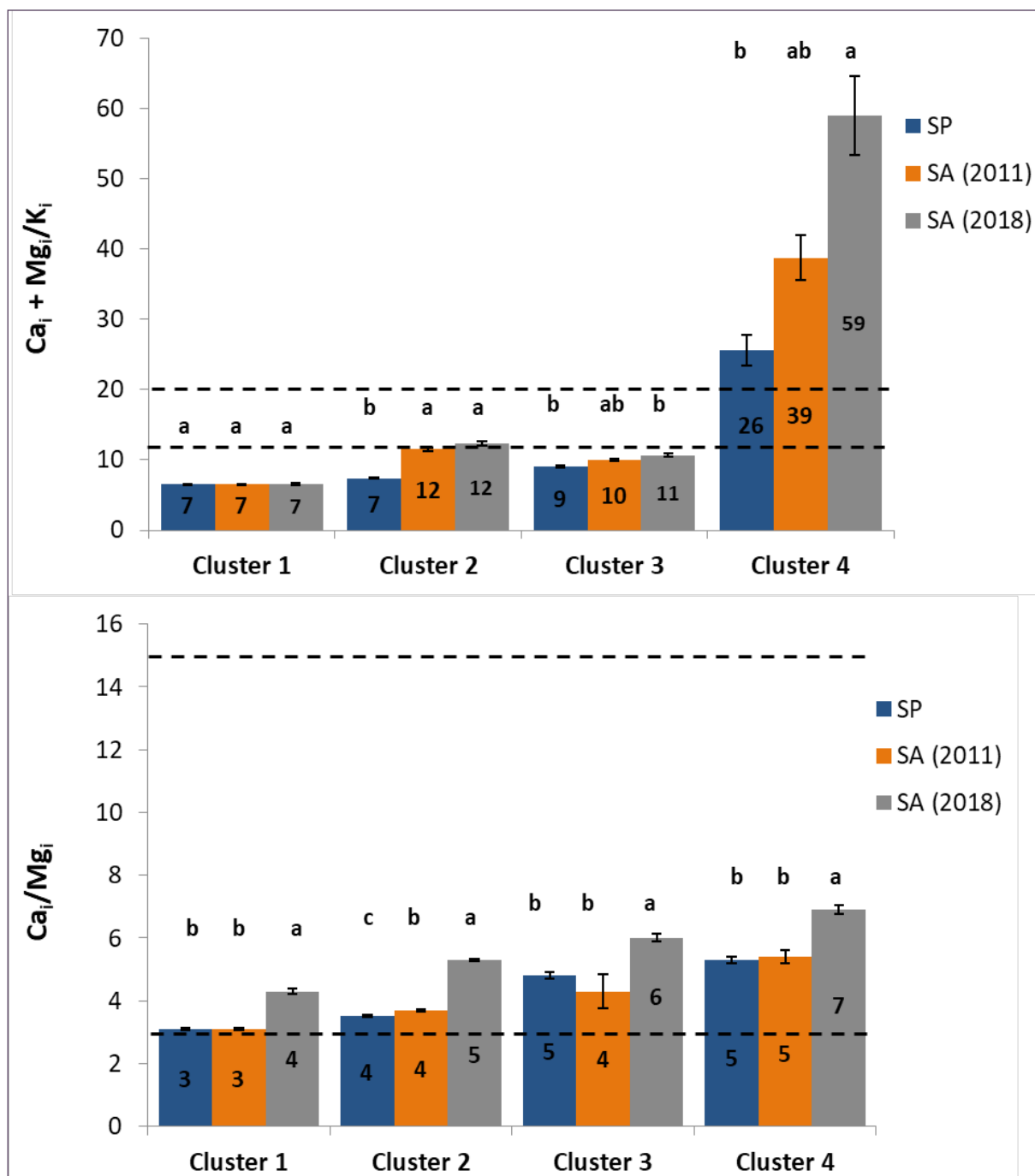


Figura 16. Distribución de los valores de potasio intercambiable ( $K_i$ ) en la capa superficial (0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y agrícolas (muestreados en 2011 y 2018).



**Figura 17.** Relación entre los contenidos de Ca, Mg y K intercambiables ( $Ca_i$ ,  $Mg_i$  y  $K_i$ ) y  $Ca_i/Mg_i$  en los distintos clusters o subregiones en suelos prístinos (SP) o con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 (SA 2011) y en 2018 (SA 2018). Dentro de un cluster, columnas con la misma letra no difieren significativamente al 5% de probabilidad. Las líneas horizontales punteadas indican el rango crítico citado por Vázquez y Pagani (2015).



## Micronutrientes

### Manganeso y hierro

Los valores de Mn extractable con DTPA del muestreo realizado en 2018 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad ( $34$  a  $64 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en todos los Clusters o subregiones, y superan ampliamente a los umbrales críticos ( $2,5$  a  $8 \text{ mg kg}^{-1}$ ) informados por algunos autores (Elgala et al., 1986; Nayyar et al., 1985; Sims y Johnson, 1991; **Figura 18**). No obstante, se determinó una reducción significativa del contenido de Mn entre el 2011 y 2018, la cual osciló del 40% al 57%. Las tasas de caída variaron de  $3,3$  a  $10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (**Figura 18**), por lo que a partir de los contenidos actuales y de los umbrales de respuesta, este micronutriente podría llegar a ser limitante en un rango de tiempo que varía de 4 a 8 años según regiones.

Geográficamente, los suelos con menores valores de Mn se ubicaron al oeste de Buenos Aires y este de La Pampa, donde los suelos pasaron de tener más de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  al rango de  $10$  a  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  (**Figura 19**). Sin embargo, aún en estas zonas, los valores determinados superan a los umbrales críticos mencionados.

La actividad agrícola no disminuyó los contenidos Fe extractable con DTPA y en algunos Clusters o regiones se observó un mayor valor en los suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018 que en los suelos prístinos (**Figuras 18**), a pesar de que, junto con el Mn, es un micronutriente que presenta elevada extracción en los granos (Torri et al., 2015) y a que la fertilización es muy baja o inexistente. Esto puede deberse a que es uno de los elementos más abundantes en los suelos de la región pampeana ( $20900 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Lavado y Porcelli, 2000) y a que la acidificación de los mismos (**Figura 5**) promovió el pasaje de formas no disponibles a formas disponibles, ya que se determinó una elevada correlación entre pH y Fe extractable con DTPA ( $r = -0,56$ ). En este sentido, Lindsay (1991) informó que el aumento del Fe soluble por unidad disminución de pH es casi del 60% superior que la del Mn soluble.

Los valores de Fe extractable con DTPA en el muestreo realizado en 2018 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad ( $46$  a  $78 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en todos los Clusters o subregiones (**Figuras 18 y 20**) y superan ampliamente a los umbrales críticos ( $2,5$  a  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) informados por Sims y Johnson (1991).

En síntesis, ambos micronutrientes no serían limitantes para la producción en Molisoles con pH subácido a neutro y solo se podrían esperar deficiencias de los mismos en suelos con contenidos muy bajos de MO con pH alcalinos o en suelos calcáreos.

### Cobre y cinc

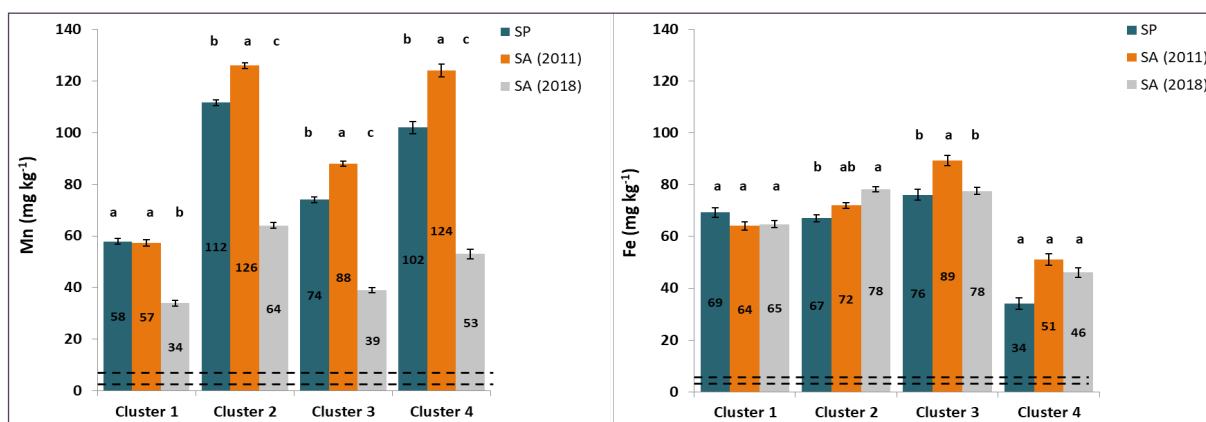
Los valores de Cu extractable con DTPA del muestreo realizado en 2018 estuvieron dentro del rango de alta a muy alta disponibilidad ( $1,2$  a  $1,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) en todos los Clusters o subregiones, y superan ampliamente a los umbrales críticos ( $0,4$  a  $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$ ) informados por algunos autores (Kruger et al., 1985; Karamanos et al., 2003). Además, la agricultura no produjo una reducción significativa del Cu ya que los suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018, mostraron similares valores que los suelos prístinos (**Figura 21**). Esto puede deberse a que es uno de los micronutrientes catiónicos que presenta menor extracción en grano y a que la disponibilidad de Cu en suelos de la región pampeana es mayor en horizontes sub-superficiales que superficiales (Ratto 2006), los cuales podrían abastecer en gran medida los requerimientos de los cultivos. En ningún área de la región pampeana se determinaron valores por debajo de  $0,6 \text{ mg kg}^{-1}$  (**Figura 22**) y, por lo tanto, la respuesta a este micronutriente es poco probable en la mayor parte del área relevada.

La agricultura redujo significativamente la disponibilidad de Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA) respecto de los suelos prístinos entre el 80% y el 86% según Clusters o zonas. Las tasas de caídas variaron de  $0,06$  a  $0,26 \text{ mg kg}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , correspondiendo el mayor valor al Cluster 4 (Entre Ríos; **Figura 21**). En 2011, el 47% de los lotes presentaban valores de Zn-DTPA menores a  $1,03 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que en 2018 dicho porcentaje creció al 67% (**Figuras 23**). Considerando que el rango crítico de Zn-DTPA en suelo para el cultivo de maíz es de  $0,8$  a  $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$  (Barbieri et al., 2017) y para la soja de  $0,51$  a  $1,27 \text{ mg kg}^{-1}$  (Bustos et al., 2019), una superficie considerable de la región pampeana podría tener suelos deficientes en este nutriente.

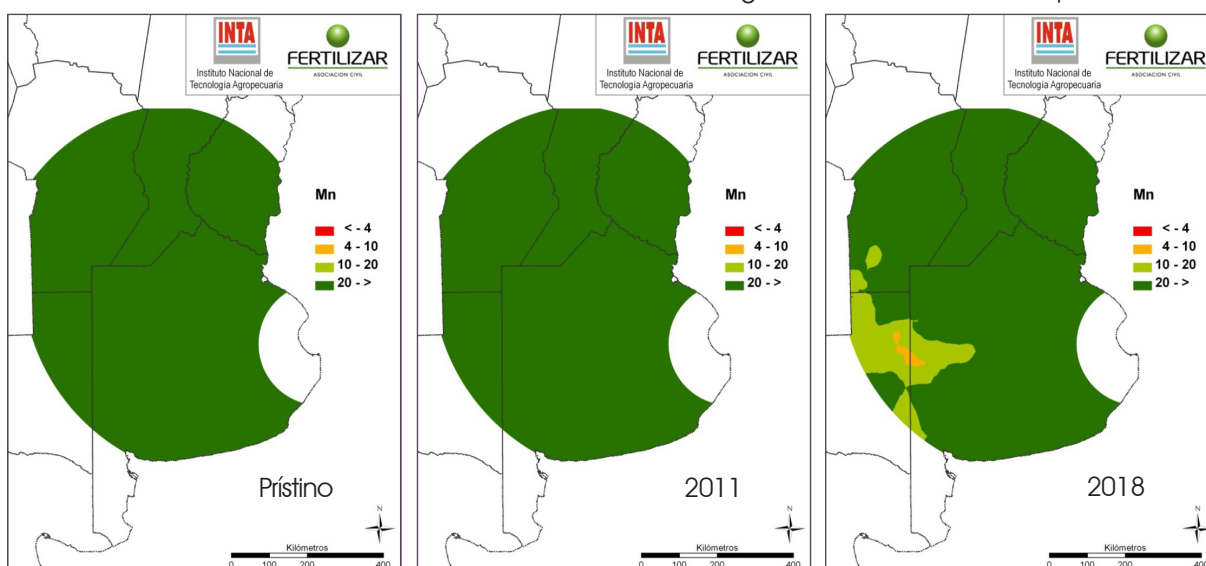
Salvo el este y sudeste de Buenos Aires el resto del área presenta valores menores a  $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$  y las áreas con suelos con concentraciones de Zn-DTPA menores a  $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$  (de alta probabilidad de respuesta para el maíz y la soja) se ubicaron

en Entre Ríos, casi toda Córdoba, sudoeste y oeste de Bs As y este de La Pampa. Las zonas con respuesta incierta (entre 0,8 y 1,2 mg kg<sup>-1</sup>) se ubicaron al oeste y noreste de Bs As, gran parte del sur de Santa Fe y sur de Córdoba (**Figura 24**). Ratto (2006) informó que el contenido de Zn en profundidad disminuye marcadamente en los suelos de la región pampeana Argentina, por lo habría escasa reserva de Zn en los horizontes sub-superficiales, por lo que los cultivos dependerían principalmente de su disponibilidad en el horizonte superficial.

En síntesis, de todos los micronutrientes evaluados hasta el momento el Zn sería limitante en una vasta superficie de la región pampeana. No obstante, estos mapas presentan tendencias regionales y la decisión acerca de fertilizar o no debe surgir de un adecuado muestreo de suelo a nivel de lote.



**Figura 18.** Niveles de manganeso (Mn) y hierro (Fe) extractable con DTPA (0-20 cm) en distintos Clusters o subregiones de la región pampeana Argentina. SP: suelos prístinos muestreados en 2011; SA (2011): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y SA (2018): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018. Líneas horizontales indican rangos críticos o nivel crítico informados por algunos autores (Elgala et al., 1986; Nayyar et al., 1985; Sims y Johnson, 1991; Meena et al., 2013). Dentro de un cluster columnas con la misma letra no difieren significativamente al 5% de probabilidad.



**Figura 19.** Niveles de Mn extractable con DTPA (mg kg<sup>-1</sup>; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

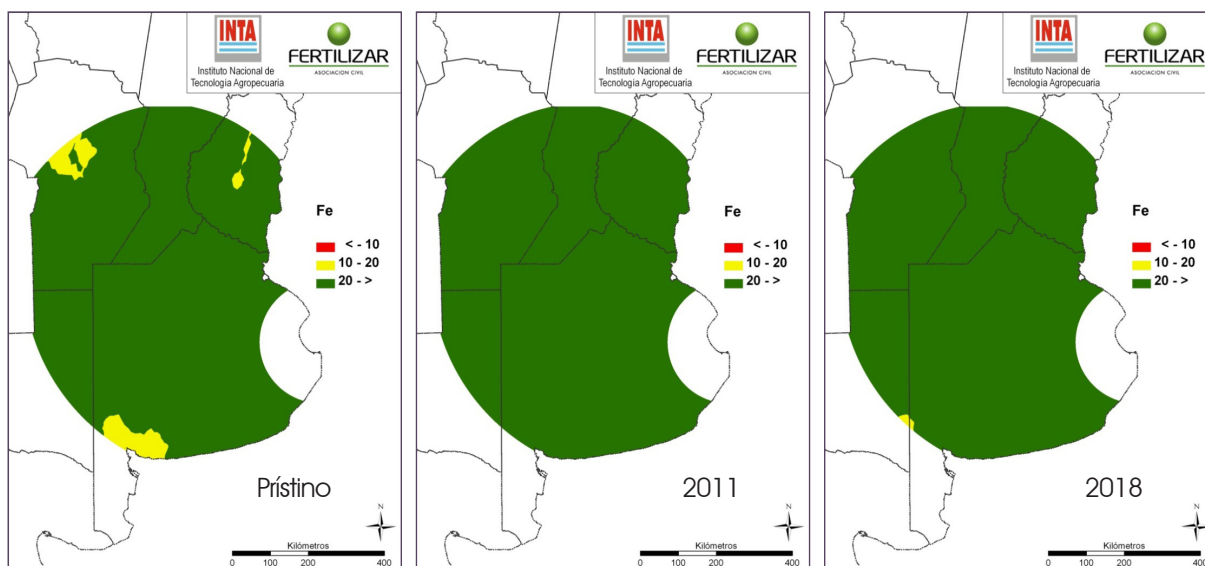


Figura 20. Niveles de hierro (Fe) extractable con DTPA ( $\text{mg kg}^{-1}$ ; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

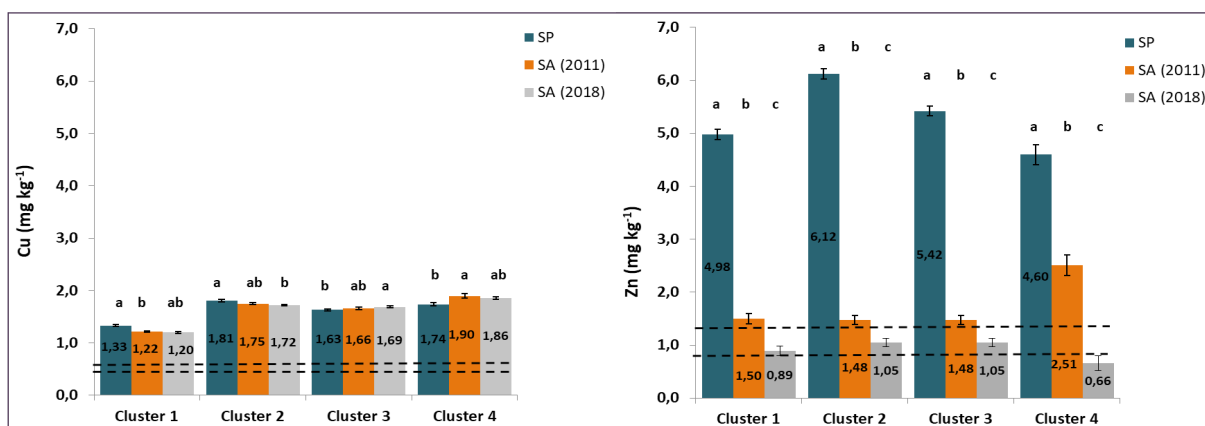


Figura 21. Niveles de cobre (Cu) y cinc (Zn) extractable con DTPA (0-20 cm) en distintos Clusters o subregiones de la región pampeana Argentina. SP: suelos prístinos muestreados en 2011; SA (2011): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y SA (2018): suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2018. Líneas horizontales indican rangos críticos informados por algunos autores (Kruger et al., 1985; Karamanos et al., 2003; Barbieri et al., 2017; Bustos et al., 2019).

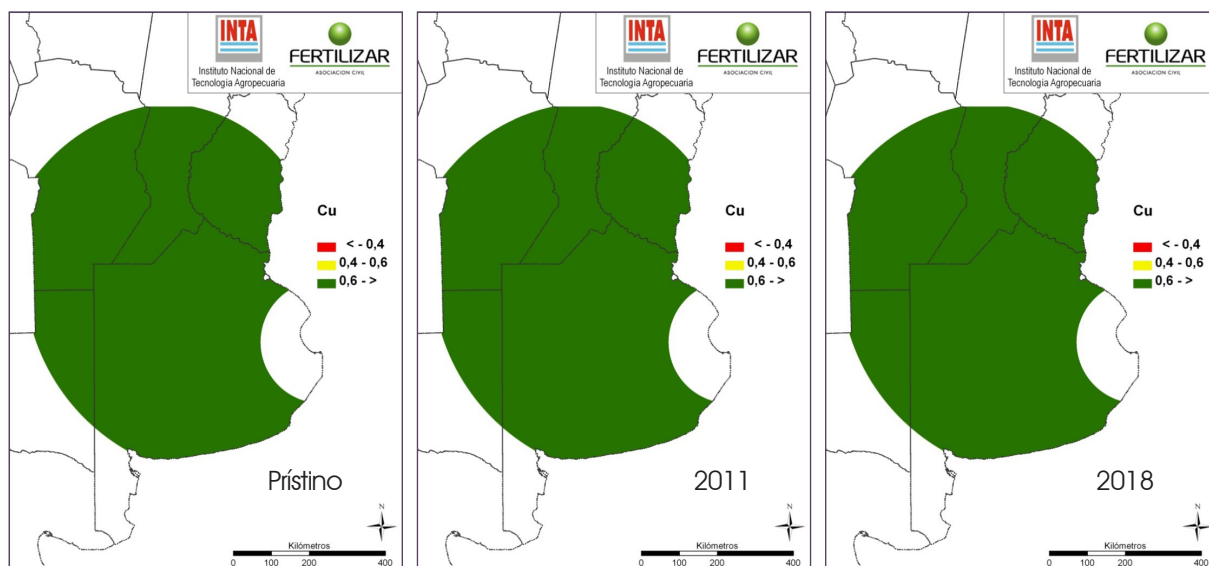


Figura 22. Niveles de cobre (Cu) extractable con DTPA (mg kg<sup>-1</sup>; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

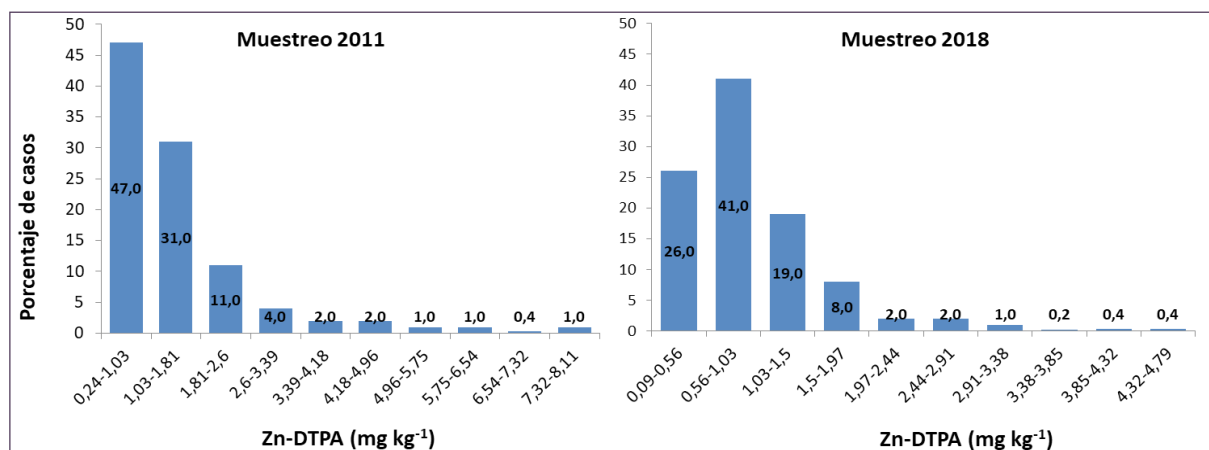


Figura 23. Frecuencia de rangos de valores de Zn extractable con DTPA (Zn-DTPA; 0-20 cm) en suelos con prolongada historia agrícola muestreados en 2011 y 2018.

## Conclusiones

Salvo en el sur y sureste de Buenos Aires, los niveles de MO no decrecieron entre el muestreo realizado en 2011 y 2018. Sin embargo, los niveles actuales están muy por debajo de los niveles originales y algunas funciones del suelo en los agro-ecosistemas, como por ejemplo la de un adecuado abastecimiento de N y S, está severamente afectada.

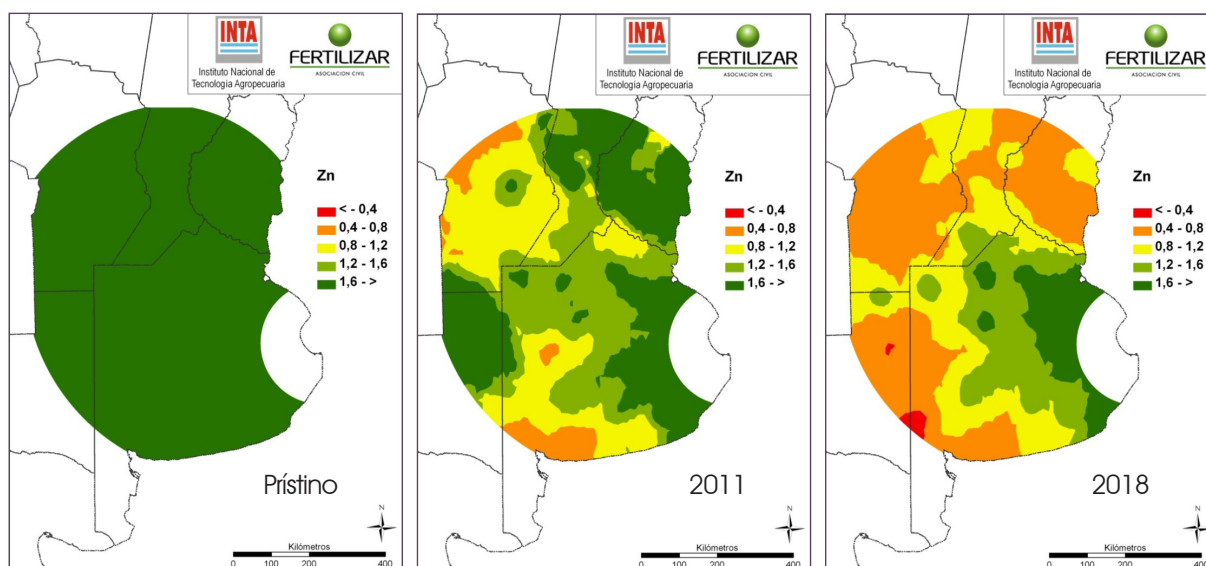
El pH de los suelos continuó disminuyendo entre el muestreo realizado en 2011 y 2018 y en algunas zonas al este de Buenos Aires y centro-norte de Santa Fe los suelos presentan niveles de pH por debajo de 6. Si bien estos niveles no serían limitantes para la mayoría de los cultivos, algunos

procesos del suelo como la mineralización de N podría verse afectado.

Los niveles de P-Bray continuaron disminuyendo entre el muestreo realizado en 2011 y 2018 y la mayor parte de los suelos de la región pampeana presentan rangos de P-Bray de bajos a medios, por lo que este nutriente podría ser limitante para la producción de los cultivos.

Las concentraciones actuales de Ca, Mg y K, en los suelos agrícolas de la región pampeana están por encima de los rangos críticos descritos en la literatura, pero estos valores disminuyeron 10%, 34% y 18% entre 2011 y 2018, respectivamente. Esta reducción indica que la liberación de cationes básicos por la intemperización desde minerales primarios es insuficiente para compen-





**Figura 24.** Niveles de cinc (Zn) extractable con DTPA ( $\text{mg kg}^{-1}$ ; 0-20 cm) de suelos prístinos (muestreados en 2011) y de suelos con prolongada historia agrícola (muestreados en 2011 y 2018).

sar las pérdidas del sistema (por exportación en granos, lavado y erosión).

A partir de las tasas de disminución de Ca, Mg, y K<sub>i</sub> determinadas entre 2011 y 2018, puede inferirse que: i) las deficiencias de Ca se observarán antes en los Clusters 1 y 2 (oeste y norte de región pampeana), ii) las deficiencias de Mg se observarán antes en los Clusters 1, 2 y 3 (toda la región pampeana, excepto la provincia de Entre Ríos), y iii) las deficiencias de K se observarán antes en los Clusters 2 y 4 (norte de la región pampeana y Entre Ríos). Por lo tanto, estos resultados sugieren que el análisis de la concentración de cationes intercambiables debe comenzar a incorporarse a los análisis de suelo de rutina para diagnosticar su disponibilidad en los laboratorios de análisis de suelo de la región pampeana.

En cuanto a los micronutrientes, el Zn es el más limitante para el crecimiento de cultivos sensibles a su deficiencia en una vasta superficie de la región pampeana y continuó disminuyendo entre el muestreo de 2011 y 2018. No obstante, la necesidad de fertilización debe surgir del análisis del suelo a nivel de lote.

## Agradecimiento

A Fertilizar Asociación Civil, Uralkali Trading SIA y Nitron Group, por el apoyo financiero para la realización de este proyecto.

## Bibliografía

- Álvarez, R & HS Steinbach. 2006. Factores climáticos y edáficos reguladores del nivel de materia orgánica. En: *Materia Orgánica «Valor Agronómico y Dinámica en Suelos Pampeanos»* (ed. R Álvarez). Editorial. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. p. 31-40.
- Aramburu Merlos, F.A.; Monzón, J.P.; Mercáu, J.L.; Taboada, M.; Andrade, F.H.; Hall, A.J.; Grassini, P. 2015. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. *Field Crops Research*. 184: 145-154.
- Barbagelata, P. A. and Mallarino, A. P. 2012. Field Correlation of Potassium Soil Test Methods Based on Dried and Field-Moist Soil Samples for Corn and Soybean. *Soil Science Society of Am. J.* 77: 318-327.
- Barbazán, M.; Bautes, C.; Beux, L.; Bordoli, M.; Cano, J.D.; Ernst, O.; García A.; FO García & A Quincke. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agroc.* 15(2): 93-99.
- Barbieri, P.A.; Sainz Rozas, H.R.; Wyngaard, N.; Eyherabide, M.; Reussi Calvo, N.I.; Salvagioti, F.; Correndo, A.; Barbagelata, P.A.; Espósito Goya, G.; Colazo, J.C.; Echeverría, H.E. 2017. Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn?, *Soil Science Soc. Am. J.* 81:556-563.
- Brady, N.; Weil, R. 1998. *Soil Acidity. The Nature and Properties of soil*. 14th ed. Prentice-Hall, inc. Simona and Schuster A Viacon Company. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Bray, R.H. & L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Bundy, L. G. 2004. *Corn fertilization*. University of Wisconsin-Madison and University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension. Cooperative Extension Publishing. 12 p.
- Bustos A.N., Sainz Rozas H.R., Alvarez C., Barbieri P.A., Eyherabide M., Wyngaard N. 2019. Diagnóstico de la disponibilidad de zinc para el cultivo de soja. XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Montevideo, Uruguay.
- Chapman, H.D. 1965. Cation-exchange capacity 1. En:

- CA. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Vol. 2. Pp. 891-901. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Correndo, A.; Rubio, G.; Ciampitti, I.A.; García, F.O.** 2011. Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. Simposio Fertilidad 2011. IPNI, Rosario, Argentina.
- Cruzate G. y R. Casas.** 2012. Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 6:7-14. IPNI. del sudeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas*. 39: 23-25.
- Divito, G.A., Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E., Studdert, G.A., Wyngaard, N.** 2011. Long term nitrogen fertilization: Soil property changes in an Argentinean Pampas soil under no-tillage. *Soil & Tillage Research*. 114: 117-126.
- Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.** 2015. Nitrógeno. Pp. 189-228. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Elgala, A.M. Ismail, A.S.; Ossman, M.A.** 1986. Critical levels of iron, manganese and zinc in Egyptian soils. *Journal of Plant Nutrition*. 9: 267-280.
- ESRI ArcMap 9.2 --** Licencia 37142261\_v9 - del set ArcGIS Desktop.
- Fox, J.** 2017. *Using the R Commander: A Point-and-Click Interface or R*. Boca Raton FL: Chapman and Hall/CRC Press.
- Gambaudo, S.; H. Fontanetto.** 2011. Diagnóstico de la acidez edáfica y su corrección. Simposio FERTILIDAD 2011, Rosario, Argentina.
- García, F.O.** 2017. El balance de nutrientes. Manejo, deterioro o polución. El papel de la fertilización. Curso Agrícola FundaCREA Buenos Aires, 25 de Julio de 2017.
- García, F.O.; Picone, L.I.; Ciampitti, I.A.** 2015. Fósforo. Pp. 229-264. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Goldman V; Echeverría, H.E.; Andrade, F.; Uhart, S.** 2002. Incidencia de la fertilización nitrogenada sobre la concentración de nutrientes en maíz. *Ciencia del Suelo* 20 (1):27-35.
- Karamanos, R.E., Goh, T.B. and Harapiak, J.T.** 2003. Determining wheat responses to copper in prairie soils. *Can. J. Soil Sci.* 83:213-221.
- Kopittke, P.M.; Menzies, N.W.** 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:259-265.
- Kruger, G.A., Karamanos, R.E. and Singh, J.P.** 1985. The copper fertility of Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.* 65:89-99.
- Larrea, G. E.** 2019. Disponibilidad de calcio, magnesio y potasio en suelos agrícolas y prístinos de la región pampeana. Tesis de Magister Scientiae en producción Vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias de Balcarce, Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Lavado, R.; Porcelli, C.A.** 2000. Contents and main fractions of trace elements in Typic Argiudolls of the Argentinean Pampas. *Chemical Speciation & Bioavailability*. 12: 67-70.
- Lindsay W.L. & W.A. Norvell.** 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42:421-428. Madison, USA.
- Lindsay, W.L.** 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: J.J. Mortvedt, editor, *Micronutrients in agriculture*. Book series 4. SSSA Madison, WI. p. 90-111.
- Meena, R.S.; Mathur, A.K. and Sharma, S.K.** 2013. Determination of critical limit of iron for wheat in soils of sub-humid southern zone (IV-B) of Rajasthan. *Green Farming*. 4: 298-302.
- Morras, HJ.** 2003. Distribución y origen de sedimentos loessicos superficiales de la pampa norte en base a la mineralogía de arenas: Resultados preliminares. *Rev. de la Asoc. Arg. de Sedimentología*. 10(1):54-64.
- Nayyar, V.K.; Sadana, U.S. and Takkar, TN.** 1985. Methods and rates of application of Mn and its critical levels for wheat following rice on coarse textured soils. *Fertilizer Research*. 8: 173-178.
- Piscitelli, M.; Varni, M.; Sfeir, A.; Ares, G.** 2010. Valores de erodabilidad (factor K-USLE) para Suelos de la representativos de la Cuenca alta del arroyo Azul (partido de de Azul, Buenos Aires). *Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata*. 109: 17-22.
- Ratto, S.E.** 2006. Los microelementos en el Sistema productivo del área pampeana. Pp. 79-112. En: M. Vázquez (ed.). *Micronutrientes en la agricultura. Diagnóstico y fertilización en la Argentina*. La experiencia brasilera. Editorial Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.
- Reussi Calvo, N.; Echeverría, H.; Sainz Rozas, H.** 2009. Determination of sulfate concentration in soil: depth of sampling. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*. 40:1624-1633.
- Sainz Rozas, H., Echeverría, H.E., Angelini, H.P.** 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Ciencia del Suelo*. 29: 29-37.
- Sainz Rozas, H., Eyherabide, M., Echeverría, H.E., Barbieri, P., Angelini, H., Larrea, G.E., Ferraris, G y Barraco, M.** 2013. ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos?. Actas del Simposio Fertilidad 2013. IPNI-FERTILIZAR. Rosario, 22 a 23 de Mayo de 2013.
- Schollenberger, C.J. & R.H. Simon.** 1945. Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soils-Ammonium acetate method. *Soil Sci.* 59:13-24.
- Sims, J.T., and G.V. Johnson.** 1991. Micronutrient soil tests. In: J.J. Mortvedt, editor, *Micronutrients in agriculture*. Book series 4. SSSA Madison, WI. p. 427-476.
- Six, J; RT Conant; EA Paul & K Paustian.** 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155-176.
- Torri, S.I.; Urricariet, S.; Lavado, R.** 2015. Micronutrientes y elementos traza. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos* Pp. 357-376.
- Vázquez, M.** 2011. Causas de la acidificación en el ambiente templado argentino, consecuencias y avances para su diagnóstico. Simposio Fertilidad 2011, Rosario, Argentina.
- Vázquez, M., A. Terminiello, A. Casciani, G. Millán, P. Gelati, J. García Díaz, J. Kostiría & M. García.** 2010. Evaluación del efecto de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa*) y propiedades edáficas en ámbitos templados argentinos. *Ciencia del Suelo*. 28: 141-154.
- Vázquez, M.S; Pagani, A.** 2015. Calcio y Magnesio. En: Echeverría, HE. & FO García (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilidad de cultivos* Pp. 317-355.
- Walkley, A.; Black, Y.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37. ◀

# Capacidad de secuestro de carbono de los suelos pampeanos

Roberto Alvarez <sup>1,2</sup> y Gonzalo Berhongaray <sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453 (1417) Buenos Aires, Argentina. <sup>2</sup>: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

<sup>3</sup>: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral. Kreder 2805 (3080), Esperanza, Santa Fe, Argentina.  
ralvarez@agro.uba.ar

## Introducción

Los suelos pueden usarse como sumideros de carbono atmosférico mitigando el calentamiento global (Minasny et al., 2017). Esto ha determinado que se realicen numerosos estudios para establecer cómo la actividad antrópica puede compensar las pérdidas de carbono debidas al uso del suelo (Sanderman et al., 2017). Comúnmente se ha estimado cuánto carbono pueden secuestrar los suelos asumiendo que los sistemas naturales, como pastizales o bosques, representan el máximo nivel de carbono que un suelo puede almacenar (Sperow, 2016). La diferencia entre el carbono en suelos cultivados y naturales representaría el potencial secuestro de carbono que se podría lograr (Don et al., 2011).

A medida que aumenta el contenido de la fracción fina del suelo (arcilla + limo < 20  $\mu$ ), aumenta la cantidad de carbono orgánico protegido de la mineralización (Six et al., 2002). Los efectos del uso y del manejo del suelo son menores sobre esta fracción estabilizada que sobre el carbono de las fracciones lábiles (Chung et al., 2008). Se han generado modelos capaces de estimar la capacidad de secuestrar carbono estable del suelo en función de su textura (Six et al., 2002). Muchos sistemas naturales tienen niveles de carbono menores a la capacidad de carbono estimada de esta manera (Wiesmier, 2014; Cheng et al., 2018). Los modelos de estimación de la capacidad de carbono se han perfeccionado recientemente y permiten establecer cuánto carbono puede secuestrar un suelo en la fracción estabilizada (Feng et al., 2013). La diferencia entre la capacidad de carbono y el nivel de carbono que el suelo efectivamente contiene se ha denominado el déficit de carbono. Un uso eficiente de recursos con el fin de secuestrar carbono lleva a la necesidad de determinar qué

suelos son lo que tienen mayor déficit de carbono. En ellos deberían concentrarse los esfuerzos de manejo orientados a incrementar el nivel de carbono orgánico. Nuestro objetivo fue estimar el déficit de saturación de carbono de los suelos pampeanos, qué factores lo regulan y generar un mapa del déficit a nivel de la Región Pampeana.

## Materiales y Métodos

Se utilizaron datos de un estudio regional en el cual fueron muestreados 82 establecimientos distribuidos en la Región Pampeana. En cada establecimiento se seleccionaron sitios bajo diferentes usos del suelo: arboledas, controles nunca cultivados, pasturas implantadas, lotes bajo cultivos de granos y bajos hidromórficos pastoreados. La ubicación de los establecimientos, la estrategia del muestreo y los métodos analíticos usados pueden encontrarse en Berhongaray et al. (2013). En este trabajo no se utilizaron datos de las arboledas (ver abajo) por lo que 296 sitios fueron incluidos en el análisis totalizando 1045 muestras de suelo. La temperatura y precipitación media anual de los sitios se estimó por interpolación kriging usando datos de 50 observatorios meteorológicos (Alvarez et al., 2018). La capacidad de carbono de los suelos se estimó con el modelo de Feng et al. (2013) ajustado a suelos con predominancia de minerales 2:1:

$$\text{Capacidad de carbono (mg g}^{-1} \text{ suelo)} = 0.84 \times (\text{arcilla} + \text{lino} < 20 \mu\text{m}) (\text{g } 100 \text{ g}^{-1} \text{ suelo})$$

Debido a que en las muestras se midió limo total (2-50  $\mu$ m) y no limo fino (2-20  $\mu$ m) está fracción se estimó. Para ello se correlacionó el contenido de ambas fracciones en 780 horizontes de suelos pampeanos con datos tomados de GeoINTA (2018). El modelo de regresión ajustado ( $y =$

$0.676 \cdot x^{1.01}$ ) permitía una muy buena estimación de la fracción  $< 20 \mu\text{m}$  usando como predictor la fracción  $< 50 \mu$  ( $R^2 = 0.92$ ).

El contenido de carbono estabilizado en la fracción fina de la capa superficial del suelo se estimó promediando los resultados del meta-análisis de Gregorich et al. (2006) y el muestreo regional de Wiesmeier et al. (2014). Estos promedios fueron 79% para suelos cultivados y 69% para pastizales. Para bosques, no se calculó un coeficiente promedio debido a la gran disparidad entre ambos estudios y ese uso del suelo se excluyó del presente trabajo. Para estimar la variación en profundidad de esa fracción estabilizada se usaron datos de 14 suelos locales (Ojeda et al., 2018). Los perfiles de la relación (carbono orgánico particulado/carbono orgánico total)  $\times 100$  variaron entre 18% y 24% sin una clara tendencia en profundidad por lo que se aplicó el valor medio del coeficiente de estabilización en superficie a todas las capas de suelo. El déficit de saturación se calculó como la diferencia entre la capacidad de carbono y el carbono estabilizado en la fracción fina del suelo. La relación de saturación se calculó como (carbono en la fracción fina/capacidad de carbono)  $\times 100$ . Los resultados se expresaron como stocks de carbono afectando la concentración de carbono por la densidad aparente de cada estrato de suelo. El mapa de saturación de carbono de la Región Pampeana se elaboró usando una librería de datos de textura, contenido de carbono orgánico y usos del suelo a nivel de partido previamente elaborada (Berhongaray et al., 2013) usando métodos similares a los aplicados a nivel de sitio.

Métodos de regresión simple y múltiple se usaron para relacionar variables. La variable dependiente fue el déficit de saturación y los predictores fueron el contenido de partículas finas del suelo, la profundidad, el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura y la precipitación del sitio y el uso del suelo como variable categórica. El carbono orgánico total no fue testeado como predictor debido a su fuerte correlación con las otras variables (Berhongaray et al., 2013). Se testearon términos lineales, cuadráticos e interacciones (Colwell, 1994) que se incluyeron en los modelos solo si eran significativos ( $P < 0.05$ ) o incrementaban el  $R^2$  en 1% o más. La selección de predictores se hizo por *forward stepwise* y se chequeó la autocolinealidad de los predictores por el VIF (Neter et al., 1990). La performance de los modelos se analizó usando IRENE (Fila et al.,

2003). Modelos mixtos se emplearon para testear diferencias en el déficit de saturación entre usos del suelo (Littell et al., 1998). El establecimiento se tomó como efecto aleatorio y el uso como efecto fijo ( $P < 0.05$ ), anidando la profundidad dentro del tratamiento debido a la no independencia de datos tomados de un mismo perfil. Variables de clima y suelo se testearon como covariables. Los promedios se separaron por contraste lineales.

## Resultados y Discusión

La variabilidad de las condiciones de clima y suelo fue enorme entre los sitios de muestreo y ha sido descripta anteriormente (Alvarez et al., 2018; Berhongaray et al., 2013). El déficit de saturación aumentó en sitios de alta temperatura ( $R^2 = 0.30$ ) y decreció con la precipitación ( $R^2 = 0.18$ ), pero la variable determinante fue la textura. A medida que aumentaba el contenido de partículas finas del suelo aumentaba el déficit ( $R^2 = 0.70$ ). Otras variables tuvieron escaso o nulo impacto sobre el mismo. La profundidad también tuvo un alto impacto (Figura 1). Mientras que la textura media y la capacidad de carbono no mostraron una clara tendencia en profundidad, el déficit de saturación estaba muy estratificado como contraparte de la estratificación del contenido de carbono orgánico de las muestras. A mayor profundidad, mayor déficit de saturación. Hubo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el déficit de saturación entre usos del suelo en el orden bajos hidromórficos  $>$  suelos cultivados  $>$  pastizales. Integrando el estrato 0-1 m, la relación de saturación promedio fue del 23%.

Un modelo de regresión múltiple permitió explicar la mayor parte de la variabilidad del déficit de saturación:

$$\begin{aligned} \text{Def. sat. (t ha}^{-1}\text{)} = & -135 + 2.3 (\text{arcilla+limo} < 20 \mu) \\ & + 0.45 \text{ prof. (cm)} + 8.2 \text{ temp. (}^\circ\text{C)} \\ & - 0.029 \text{ Lluvia (mm)} + 5.8 \text{ Bajos} - 4.2 \text{ Pastizales} \\ & (\text{ec. 1}) \end{aligned}$$

El modelo tuvo muy buena performance con ordenada no diferente de 0 y pendiente no diferente de 1 (Figura 2).

El déficit de saturación de los suelos pampeanos copió el gradiente textural de la región (Figura 3). El déficit se incrementó del sudoeste al noreste. En la Región Semiárida, el déficit era bajo y en



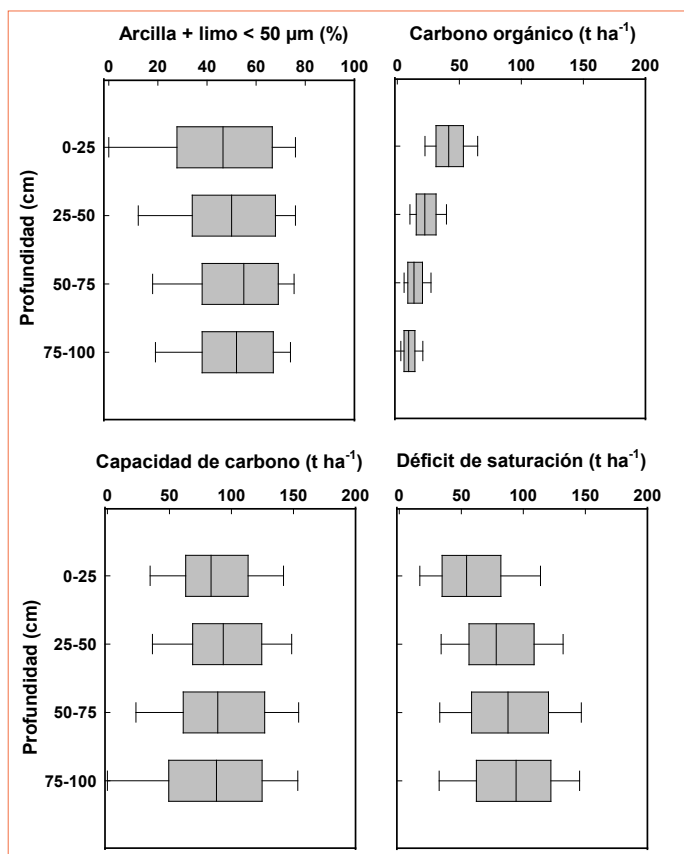


Figura 1. Box plot de textura, carbono orgánico, carbono estabilizado en la fracción fina y déficit de saturación de los suelos muestreados ( $n = 296$ ) en relación a la profundidad de la capa de suelo. Se grafican los percentiles 5, 25, 50, 75 y 95.

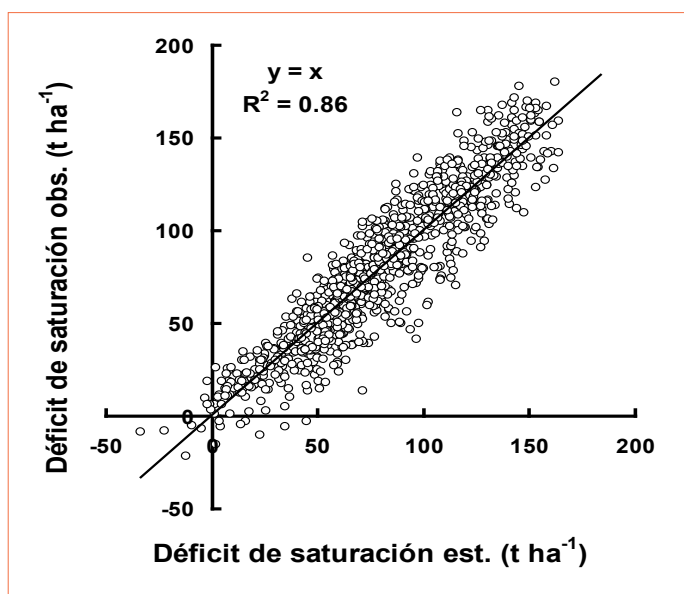


Figura 2. Relación entre el déficit de saturación observado en suelos pampeanos y el estimado por el modelo de regresión de la ec. 1.

la porción más húmeda y con suelos más finos se incrementó. Comparando partidos con ubicaciones extremas el déficit de saturación llegó a incrementarse en un orden de magnitud. En promedio para toda la región el estrato 0-25 cm puede secuestrar un 20% de la capacidad total de secuestro de carbono en el primer metro del perfil. Esta capacidad es muy grande llegando a cientos de toneladas de carbono por hectárea en la Pampa Ondulada y áreas circundantes.

El gradiente textural fue el principal controlador del déficit de saturación en la Región Pampeana. Los suelos más arenosos estaban cerca de la saturación de carbono mientras que suelos de textura fina tienen una alta capacidad de secuestro de carbono. Resultados similares han sido reportados en otras áreas (Wiesmier et al., 2014; Di et al., 2017). En el caso de suelos de textura franco arcillo limosa del noreste de la región, el secuestro potencial de carbono equivale a 2-3 veces el nivel actual de carbono. Los estratos profundos del suelo son los que poseen mayor capacidad de secuestro de carbono debido a su bajo nivel de materia orgánica. Por debajo de 25 cm de profundidad se puede secuestrar un 80% del potencial total de secuestro de los suelos. Efectos climáticos como los detectados en la Pampa han sido reportados en estudios regionales en Alemania (Wiesmier et al. 2014) y se deben a los efectos conocidos del clima sobre el balance de carbono del suelo. A mayores precipitaciones aumenta el input de carbono en restos vegetales y a mayor temperatura se acelera la mineralización de la materia orgánica, impactando ambos procesos el nivel de carbono secuestrado en el suelo y en contraparte, sobre el déficit de saturación. Posiblemente en los bajos el déficit de saturación es mayor a otros usos del suelo debido a la baja productividad primaria neta de estos sitios (Paruelo et al., 2010), mientras que en suelos agrícolas las pérdidas de carbono debidas al uso agrícola pueden justificar su mayor déficit respecto de pastizales (Berhongaray et al., 2013). Sin embargo, éstos últimos tampoco estaban saturados de carbono en la frac-

ción estable y en el caso de sitios con texturas finas aún los pastizales pampeanos tienen alta capacidad de secuestrar carbono.

Se estimó que la capacidad potencial de secuestrar carbono de la Región Pampeana es equivalente al C-CO<sub>2</sub> que produce Argentina en 330 años por quema de combustibles fósiles (World Bank, 2018). No sería esperable que muchos suelos puedan alcanzar su capacidad de carbono, pero si se aplican prácticas de manejo tendientes a secuestrar carbono, la región es un sumidero de carbono muy importante. La Pampa Ondulada y las áreas circundantes son las que tienen mayor potencial de secuestro debido a su clima húmedo y textura fina y es en esta subregión donde los esfuerzos para aumentar el carbono del suelo pueden generar mayores resultados. Se trata de un área de alto potencial de rendimiento (De Paepe et al., 2013) donde las mejoras tecnológicas que impacten la productividad de los suelos pueden llevar al secuestro de carbono.

### Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Buenos Aires (Proyecto 20020130100484BA) y CONICET (Proyecto 084, período 2014-2016).

### Bibliografía

- Alvarez, R., A. Gimenez, M. Caffaro, F. Pagnanini, V. Recondo, C. Molina, G. Berhongaray, M. Mendoza, D. Ramil, F. Facio, J. De Paepe, H. Steinbach y R. Cantet. 2018. Land use affected nutrient mass with minor impact on stoichiometry ratios in Pampean soils. *Nutr. Cycling Agroecosys.* 110: 257-276.
- Berhongaray, G., R. Alvarez, J. De Paepe, C. Caride, C Y R. Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192: 97-110.
- Chen, S., D. Arrouays, D. Angers, M. Martin y C. Walter. 2018. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. *Soil Till. Res.* (DOI: <https://doi.org/10.1016/f.still.2018.11.001>).
- Chung, H., H. Grove Y J. Six. 2008. Indications for soil carbon saturation in a temperate agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1132-1139.
- Colwell, J.D. 1994. Estimating Fertilizer Requirements. A Quantitative Approach. CAB International, UK, pp. 259.
- De Paepe, J. y R. Alvarez. 2013. Developments of a soil productivity index using an artificial neural network approach. *Agron. J.* 105: 1803-1813.
- Di, J., W. Feng, W. Zhang, A. Cai y M. Xu, M. 2017. Soil organic carbon saturation deficit under primary agricultural managements across major croplands in China. *Ecosys. Health and Sustain.* 3: 1364047.
- Don, A., Schumacher, J. & Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 17, 1658-1670.

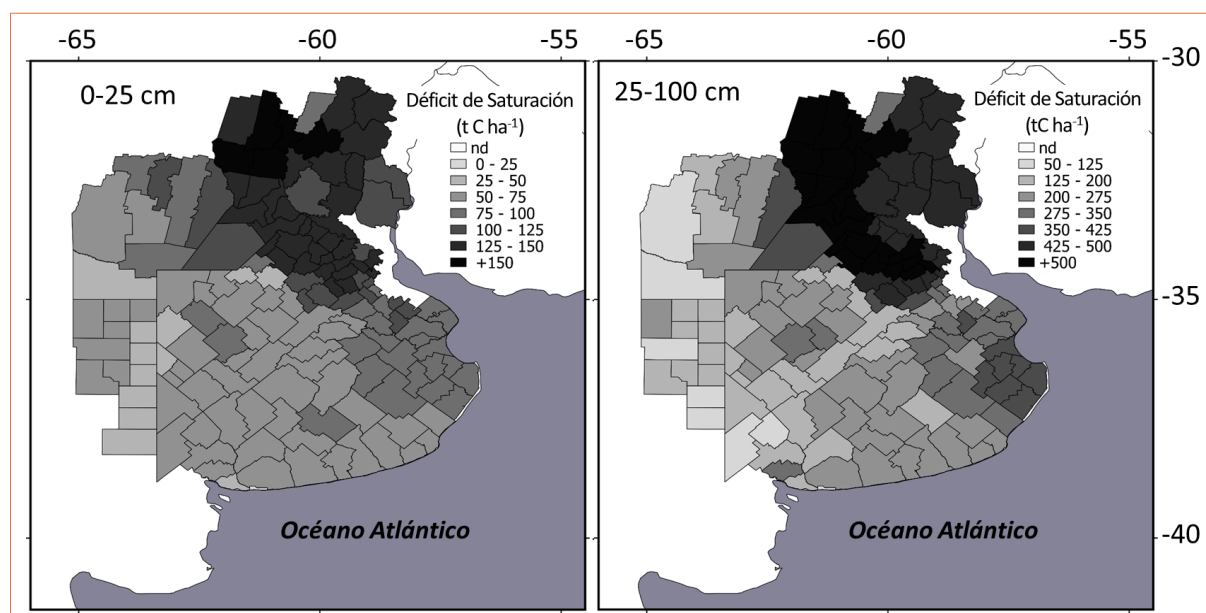


Figura 3. Mapa del déficit de saturación de los suelos pampeanos.

Feng, W., A. Plante, J. Six. 2013. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles. *Biogeochemistry* 112: 81-93.

Fila, G., G. Bellocchi, M. Acutis y M. Donatelli. 2003. IRENE: a software to evaluate model performance. *Eur. J. Agron.* 18: 369-372.

Geointa. 2018. [www.geointa.inta.gob.ar/](http://www.geointa.inta.gob.ar/) (acceso 01/06/2018).

Gregorich, E., M. Beare, U. McKim y J. Skjemstad. 2006. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 975-985.

Littell, R., P. Henry y C. Ammerman. 1998. Statistical analysis of repeated measures data using SAS procedures. *J. Anim. Sci.* 76:1216-1231.

Neter, J., W. Wasserman y M. Kutner. 1990. Applied linear statistical models. Irwin inc. Eds., Illinois, USA. Pp.1172.

Minasny, B., B. Malone, A. McBratney, D. Angers, D. Arrouays, A. Chambers, V. Chaplot, Z. Chen, K. Cheng, B. Das, D. Field, A. Gimona, C. Hedley, S. Hong, B. Mandal, B. Marchant, M. Martinc, B. McConkey, V. Mulder, S. O'Rourke, A. Richer-de-Forges, I. Odeh, J. Padarian, K. Paustian, G. Pan, L. Poggio, I. Savin, V. Stolbovoy, U. Stockmann, Y. Sulaeman, C. Tsui, T. Vågen, B. van Wesemael y L. Winowiecki. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292: 59-86.

Ojeda, J., O. Caviglia y M. Agnusdei. 2018. Vertical distribution of root biomass and soil carbon stocks in forage cropping systems. *Plant and Soil* 423: 175-191.

Paruelo, J., G. Piñeiro, G. Baldi, S. Baeza, F. Lezama, A. Altesor y M. Oesterheld. 2010. Carbon stocks and fluxes in rangelands of the Río de la Plata basin. *Rangeland Ecol. Manage.* 63: 94-108.

Sanderman, J., T. Hengl y G. Fiske. 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *PNAS* 114: 9575-9580.

Six, J., R. Conant, E. Paul y K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241: 155-176.

Wiesmier, M., R. Hübner, P. Spörlein, U. Geus, E. Hangen, A. Reischl, B. Schilling, M. Von von Lüt-zow, M. y I. Kögel-Knabner. 2014. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Global Change Biol.* 20: 653-665.

World Bank. 2018. <https://worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.SF.KT?view=chart>.

(Acceso 10/18/2018). ◀

**Conocer más.  
Crecer mejor.**

8 y 9 de Mayo  
Metropolitano  
Rosario  
Argentina

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

**Simposio  
Fertilidad  
2019** Conocer más.  
Crecer mejor.

## Fracciones orgánicas de fósforo del suelo en el diagnóstico de fertilidad fosfatada

Stefania Appelhans<sup>1,2,3</sup>, Pedro Barbagelata<sup>2,3</sup>, Ricardo Melchiori<sup>3</sup> y Flavio Gutierrez Boem<sup>4</sup>

<sup>1</sup> CONICET, <sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agropecuarias- UNER, <sup>3</sup> INTA EEA Paraná, <sup>4</sup> INBA (CONICET UBA)

Facultad de Agronomía – UBA

[Appelhans.stefania@inta.gob.ar](mailto:Appelhans.stefania@inta.gob.ar)

### Introducción

El fósforo (P) es un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, y con frecuencia es deficiente en los suelos agrícolas. El P total del suelo supera los requerimientos de los cultivos, pero se encuentra principalmente en formas no disponibles para los cultivos. El P del suelo incluye fracciones orgánicas e inorgánicas, donde el P orgánico representa del 30% al 65% del P total (Condon et al., 2005).

En general, el P de la materia orgánica del suelo contribuye al P disponible para los cultivos a través de su mineralización (Condon et al., 2005), y este proceso es especialmente importante en suelos con baja disponibilidad de P inorgánico (Sharpley 1985; Stewart y Sharpley, 1987; Thien y Myers, 1992; Ciampitti et al., 2011). Boschetti et al. (2003) y Picone et al. (2007) mostraron que las fracciones de P orgánico lábiles y moderadamente lábiles predominan sobre las fracciones de P inorgánico lábiles, especialmente en algunos suelos bien evolucionados como los Molisoles y Vertisoles de la región pampeana argentina.

El P orgánico del suelo está compuesto por fracciones de diferente labilidad, desde lábiles hasta altamente resistentes a la mineralización (Hedley et al., 1982), y se han propuesto muchas metodologías para determinarlas (Hedley et al., 1982; Thien y Myers, 1992; Tiessen et al., 1994; Wyngaard et al., 2013). Entre las fracciones de P lábil, se ha informado que el P total y orgánico en la fracción gruesa del suelo (FG) (o "materia orgánica particulada", ó "fracción particulada", fracción de suelo  $>53 \mu\text{m}$ ) es sensible a la fertilización continua con P en el largo plazo (Ciampitti et al., 2011; Wyngaard et al., 2013). El P total en la fracción gruesa del suelo (Pt-FG) se relacionó con el P acumulado a R1 en maíz (*Zea mays* L.), y ha sido sugerido como un índice promisorio para el diagnóstico de disponibilidad de P de suelo (Ciampitti et al., 2011). Además, Wyngaard et al. (2016) informaron que el P orgánico en la FG (Po-FG) era un indicador de la mineralización de

P orgánico y, por lo tanto, una fuente potencial de P disponible para las plantas. Sin embargo, resultados recientes no mostraron ninguna relación entre el rendimiento relativo del cultivo de soja (*Glycine max* L.Merr.) y el Pt-FG en una red de experimentos de fertilización con P realizados en la región pampeana de Argentina (Appelhans et al., 2016). En consecuencia, como los estudios anteriores no mostraron resultados concordantes, es relevante determinar si la fertilización a largo plazo con P induce cambios en Pt-FG y Po-FG; y si estas fracciones de P del suelo están relacionadas con la acumulación de P y con el rendimiento de los cultivos de soja y maíz.

El P extraído con  $\text{NaHCO}_3$  es considerado una fracción de P disponible para los cultivos (Tiessen y Moir, 1993; McDowell et al., 2008) que representa una fracción de P inorgánico lábil como lo hace el Bray1-P (Bray y Kurtz, 1945), pero además incluye una fracción de P orgánico fácilmente mineralizable (Boschetti et al., 2003). En un estudio reciente se mostró que el total de P extraído con  $\text{NaHCO}_3$  se relacionó con el rendimiento del cultivo de soja (Appelhans et al., 2016), y se espera que sea sensible a la fertilización con P en el largo plazo.

Las fracciones de P orgánico se han medido en suelos con diferentes texturas, tratamientos de fertilización y secuencias de cultivos (Boschetti et al., 2003; McDowell et al., 2008; Wyngaard et al., 2013; Appelhans et al., 2016), pero no se han relacionado con variables nutricionales de los cultivos de soja y maíz con fertilización con P en el largo plazo. El método de diagnóstico actual para las recomendaciones de fertilización con P en la región pampeana de Argentina utiliza el índice de Bray1-P para estimar la disponibilidad de P, pero éste solo considera una fracción de P inorgánico (Suñer et al., 2002; Ciampitti et al., 2011). La inclusión de fracciones de P orgánico lábil en los análisis de rutina para estimar la disponibilidad de P podría mejorar las recomendaciones de fertilización fosfatada (McDowell et al., 2008; Steffens et al., 2010; Dodd y Sharpley,



2015; Appelhans et al., 2016).

Los objetivos de este estudio fueron evaluar (1) el efecto la fertilización con P en el largo plazo sobre el rendimiento, biomasa, concentración de P en grano y P acumulado por los cultivos de maíz y soja, (2) la relación entre las fracciones de P del suelo que más aumentan con la fertilización con P en el largo plazo y la acumulación de P y el rendimiento de los cultivos de soja y maíz en un suelo Vertisol y Molisol, (3) si la inclusión de fracciones orgánicas de P mejora la relación del test de P disponible del suelo con los rendimientos de los cultivos en comparación al índice de Bray1-P.

## Materiales y métodos

### Características del sitio y diseño experimental

El estudio se realizó utilizando muestras de suelo provenientes de ensayos de fertilización fosfatada de larga duración iniciados en 2006 y 2007 en dos suelos contrastantes, realizados en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Paraná (31° 50' de latitud sur y 60° 31' de longitud oeste). Los suelos de los sitios experimentales fueron un suelo Molisol Serie Tezanos Pinto, clasificado como Argiudol ácuico, y un suelo Vertisol Serie Febré, clasificado como Cromuderte árgico. El experimento en el suelo Molisol presentó una secuencia de trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja - maíz, mientras que en el Vertisol el ensayo presentó una secuencia de cultivos: Trigo/soja - maíz - soja. La región posee un clima templado húmedo (precipitación anual promedio  $\approx 1000$  mm, temperatura media anual  $\approx 18.3$  °C).

Los tratamientos resultaron de una combinación factorial de dos factores con dos niveles cada uno: dos dosis iniciales de fertilización con P (0 y 200 kg P ha<sup>-1</sup>), y dos dosis de fertilización anual con P (0 y 36 kg P ha<sup>-1</sup>) aplicados como superfosfato triple. Los tratamientos estaban dispuestos en un diseño en bloques completos aleatorizados, con 4 repeticiones y con las unidades experimentales de 4,8 m x 12 m. Los tratamientos

tuvieron un arreglo en parcelas divididas, donde la parcela mayor fue la fertilización inicial, y la parcela menor (sub-parcela) fue la fertilización anual. La fertilización inicial se realizó al voleo a mano en junio de 2006 en el sitio Vertisol y en junio de 2007 en el sitio Molisol. La fertilización anual se realizó al voleo a mano en junio de cada año a partir del año 2007 para ambos sitios.

Se realizó un muestreo de suelo luego de 9 años de fertilización anual continua (2016). Las muestras de suelo fueron tomadas en el mes de junio, a dos profundidades de 0-5 y de 5-20 cm, y fueron secadas al aire, molidas y tamizadas a 2 mm.

### Análisis de suelo

Al inicio de los experimentos (2006 y 2007 para el sitio Vertisol y Molisol, respectivamente) se realizó un análisis de suelo para caracterizar los sitios. En cada muestra de suelo se determinó: pH (Van Lierop, 1990), textura de suelo (Gee y Bauder, 1986), carbono orgánico del suelo (COS) (Walkley y Black, 1934), y Bray1-P (Bray y Kurtz, 1945) (Tabla 1).

Las muestras de suelo de los distintos tratamientos (2016) se fraccionaron utilizando un método de separación física por tamaño de partículas. Se siguió la técnica propuesta por Cambardella y Elliott (1992) con modificaciones, utilizando bolitas de vidrio como agente dispersante (Irizar et al., 2010). Brevemente, se agitaron 10 g de suelo durante 16 horas con 30 mL de agua destilada y 2 bolitas de vidrio. Luego, cada muestra se tamizó a 53  $\mu$ m en húmedo haciendo movimientos de vaivén hasta que el agua de salida a través de este resultase límpida. El material menor a 53  $\mu$ m se recolectó en bandejas de aluminio. Se recolectaron dos fracciones: la fracción del suelo menor a 53  $\mu$ m (fracción asociada a minerales, o fracción fina: FF); y la fracción de suelo mayor a 53  $\mu$ m (fracción particulada, o fracción gruesa: FG). Ambas se secaron en estufa a una tempe-

**Tabla 1.** Características de suelo de los sitios Vertisol y Molisol al inicio de los experimentos (0-20 cm de profundidad).

Suelo	pH	arcilla	limo	arena	COS	Bray1-P
		.....%.....			g kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
Molisol	6.3	32.4	65.7	1.9	15.9	21.1
Vertisol	7.4	42.8	51.6	5.6	20.3	7.2

ratura de 105°C hasta peso constante y luego fueron homogeneizadas a mano.

Se determinó el P total (Pt), inorgánico (Pi) y orgánico (Po) en la fracción fina (Pt-FF, Pi-FF y Po-FF, respectivamente) y en la fracción gruesa (Pt-FG, Pi-FG y Po-FG, respectivamente), para las dos profundidades de muestreo (0-5 y 5-20 cm). Para determinar el Pt se utilizó el método de calcinación (Kuo, 1996), sometiendo 1 g de cada una de las muestras en crisoles de porcelana a 550°C durante 2 horas en una mufla, convirtiendo así el Po en Pi. Posteriormente, se realizó la extracción de las muestras calcinadas con  $H_2SO_4$  0.5 M, para lo cual se agregaron 25 mL del ácido en tubos Falcon y se agitó durante 16h. A continuación, se centrifugó, se tomó una alícuota de 10 mL del sobrenadante, se transfirió a un matraz y se realizó la corrección de pH. Luego se determinó el P por colorimetría a una longitud de onda de 882 nm (Murphy y Riley, 1962). De igual manera se determinó el Pi mediante extracción con  $H_2SO_4$  0.5 M, utilizando muestras sin calcinar. El Po se obtuvo por diferencia entre el P de las muestras calcinadas (Pt) y sin calcinar (Pi), como:  $Po = Pt - Pi$ . Además, para los distintos tratamientos se determinó la concentración de Bray-1 P (Bray y Kurtz, 1945). En todas las muestras de los diferentes tratamientos se determinó también el Pi y Pt en extractos de  $NaHCO_3$ . Se agitaron 4 g de suelo con 40 ml de  $NaHCO_3$  0.5 M por 30 min (Thien y Myers, 1992). Luego, se determinó el Pi (Pi-Bic) en extractos centrifugados por colorimetría, y el Pt del extracto (Pt-Bic) luego de una digestión húmeda con  $H_2SO_4$  (Bowman, 1989). El Po (Po-Bic) fue calculado como la diferencia entre el Pt-Bic y el

Pi-Bic. Los valores de cada fracción de P a 0-20 cm de profundidad fueron calculados como un promedio ponderado de los valores de P a 0-5 cm y 5-20 cm.

### Variables de cultivo y análisis vegetal

El rendimiento de soja en el sitio Vertisol y de maíz en el sitio Molisol en la campaña 2016/17 de los distintos tratamientos fue determinado utilizando una cosechadora experimental cosechando una superficie de 12 m<sup>2</sup> en cada parcela, y corregido a 135 y 145 g kg<sup>-1</sup> de humedad, según corresponda. Además, en cada tratamiento, se realizaron muestreos de la biomasa aérea total en 1 m<sup>2</sup>. Las muestras fueron secadas en estufa a 65°C, luego se separó la biomasa de granos de la biomasa aérea total manualmente, y cada una de estas fue molida a 1 mm. Las muestras de biomasa fueron tomadas en los estadios R7 para soja y en R6 para maíz. Se determinó la concentración de P en grano y de P en la biomasa aérea (biomasa aérea total – biomasa de granos), por el método de digestión con  $HNO_3$ – $HClO_4$  (Kuo, 1996), y posterior colorimetría a 882 nm.

El rendimiento relativo (RR) se calculó como el cociente entre el rendimiento de cada tratamiento y el rendimiento del tratamiento con la máxima dosis de P, correspondiente a la aplicación inicial de 200 kg de P ha<sup>-1</sup> con aplicación anual de 36 kg de P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Se calculó la respuesta de los cultivos a la fertilización con P (Respuesta) como la diferencia entre el rendimiento de cada tratamiento y el rendimiento del tratamiento testigo

**Tabla 2.** Efecto de los tratamientos de fertilización en el rendimiento, biomasa, concentración de P en grano (P en grano), y P acumulado por los cultivos de maíz y soja en 2016.

Cultivo y suelo	Tratamiento	Dosis	Rendimiento		Biomasa		P en grano		P acumulado	
		kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>		mg g <sup>-1</sup>		kg P ha <sup>-1</sup>	
Maíz Molisol	Fertilización inicial	0	11773	a	20422	b	4.1	a	51.5	b
		200	11971	a	22383	b	4.4	a	52.2	b
	Fertilización anual	0	11653	a	19603	b	4.1	a	46.5	b
		36	12091	a	23202	a	4.4	a	57.2	a
Soja Vertisol	Fertilización inicial	0	3344	b	7323	b	4.2	b	17.7	b
		200	3672	b	8738	b	4.7	b	22.4	b
	Fertilización anual	0	2810	b	6877	b	3.8	b	13.8	b
		36	4206	a	9185	a	5.1	a	25.8	a

Letras diferentes indican efecto simple significativo de la fertilización inicial o anual (LSD,  $p < 0.05$ ).

(control sin P), y la acumulación total de P por parte del cultivo (P acumulado), multiplicando la concentración de P en grano y de P en la biomasa aérea con el rendimiento y la biomasa, respectivamente, ambos expresados en kg P ha<sup>-1</sup>.

### Análisis estadístico

Los rendimientos, biomasa, concentración de P en grano y el P acumulado por los cultivos de maíz y soja se analizaron mediante ANOVA y las medias de los tratamientos se compararon mediante un test LSD ( $p < 0.05$ ). Se determinaron los coeficientes de correlación de Pearson para las variables Bray1-P, Pt-FG, Po-FG y Pt-Bic a 0-20 cm de profundidad, y rendimiento, rendimiento relativo, respuesta, concentración de P en grano y el P acumulado por los cultivos de maíz y soja.

Para el sitio Vertisol se determinó la relación entre el rendimiento del cultivo de soja y las fracciones de P: Bray1-P, Pt-FG, Po-FG, Pt-Bic, además de los índices combinados de Pi y Po: Bray1-P + Po-FG, y Pi-Bic + Po-FG, utilizando el programa TableCurve 5.0 (Systat Software Inc., 2002), y ajustando un modelo lineal-plateau.

### Resultados

La fertilización inicial en el largo plazo no modificó ninguna variable medida para el cultivo de maíz y soja en ambos sitios (Tabla 2). En cambio, la fertilización anual con P en el largo plazo aumentó la biomasa y la acumulación total de P del cultivo de maíz y todas las variables medidas para el cultivo de soja.

El Bray1-P, el P total en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> y en la fracción gruesa del suelo fueron las fraccio-

nes de P que más aumentaron con la fertilización continua con P en el largo plazo en ambos sitios. Respecto a las fracciones de P orgánico, la que más incrementó con la fertilización con P en el largo plazo fue el Po-FG. Los coeficientes de correlación entre las fracciones de P en el suelo y las variables de los cultivos se muestran en la **Tabla 3** para los cultivos de maíz y soja, solo para aquellas fracciones de P en el suelo que más aumentaron con la fertilización con P e incluyeron P orgánico. Para el maíz en el sitio Molisol, el Pt-FG se correlacionó significativamente con la respuesta a la fertilización con P, y el Po-FG con el rendimiento del maíz, la respuesta del cultivo y el P acumulado. En el Vertisol, el Bray1-P, Pt-FG, Po-FG y Pt-Bic se correlacionaron con el rendimiento de soja, el rendimiento relativo y la concentración de P en grano. La respuesta de soja a la fertilización con P solo se correlacionó con Pt-FG, mientras que el P acumulado por el cultivo de soja se correlacionó significativamente con el Bray1-P, Pt-FG y Pt-Bic.

Las fracciones de P del suelo (0-20 cm de profundidad) que aumentaron más con la fertilización con P en el largo plazo se relacionaron con el rendimiento del cultivo de soja solo para el sitio Vertisol (Figura 1). El rendimiento del maíz no aumentó con la fertilización con P en el largo plazo en el sitio Molisol debido a la alta disponibilidad de P en el suelo. Entre las fracciones de P en el suelo que aumentaron más con la fertilización con P en el largo plazo, el Pt-Bic mostró el mayor coeficiente de determinación en su relación con el rendimiento de soja (Figura 1). El Po-FG tuvo un desempeño similar al de Pt-FG en su relación con el rendimiento de soja, y ambos tuvieron un coeficiente de determinación mayor que el Bray1-P, que es el índice utilizado en Argentina

**Tabla 3.** Coeficientes de correlación de Pearson entre las fracciones de suelo a 0-20 cm de profundidad y las variables de los cultivos: Bray1-P, P total (Pt-FG) y orgánico (Po-FG) en la fracción gruesa del suelo, P total (Pt-Bic) en el extracto de NaHCO<sub>3</sub>, y rendimiento, rendimiento relativo (RR), respuesta en rendimiento (Respuesta), concentración de P en grano (P en grano), y P acumulado por los cultivos de maíz y soja.

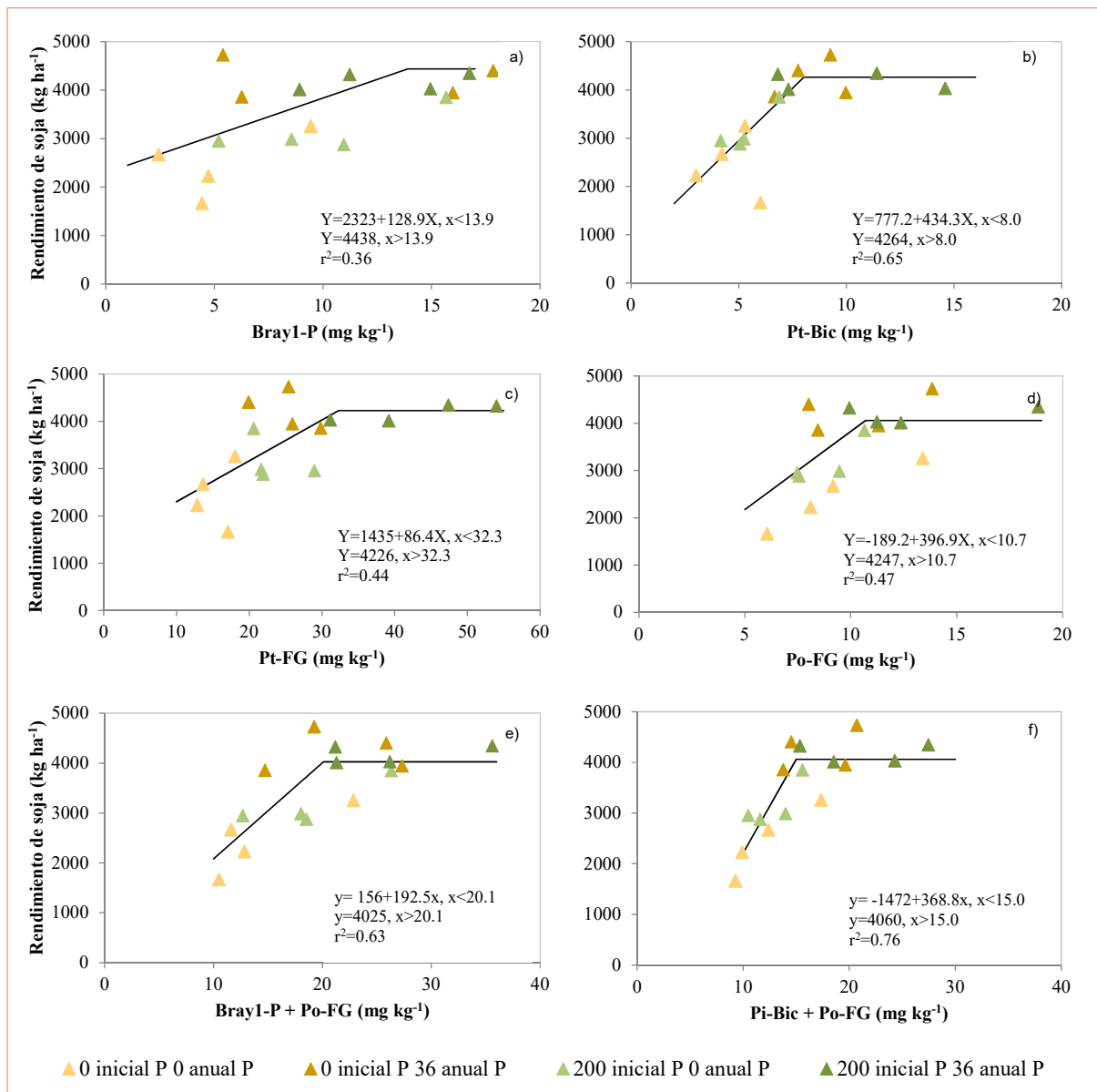
	Maíz (Molisol)					Soja (Vertisol)				
0-20 cm	Rendimiento	RR	Respuesta	P en grano	P acumulado	Rendimiento	RR	Respuesta	P en grano	P acumulado
Bray1-P	-0.29	-0.32	-0.16	0.04	0.09	0.60	0.60	0.31	0.63	0.63
Pt-FG	0.39	0.21	0.50	0.31	0.25	0.61	0.53	0.64	0.64	0.58
Po-FG	0.64	0.18	0.65	0.42	0.52	0.60	0.56	0.14	0.55	0.36
Pt-Bic	-0.05	0.29	0.11	4.00E <sup>-04</sup>	0.47	0.66	0.65	0.39	0.64	0.63

Correlaciones significativas en negrita ( $p < 0.05$ ).

para estimar la disponibilidad de P en el suelo para los cultivos. Cuando las fracciones de P inorgánico (Bray1-P y Pi-Bic) se combinaron con una fracción de P orgánico tal como Po-FG, se obtuvo un mejor ajuste que las mismas fracciones por sí solas (Figura 1e y f).

## Discusión

La fertilización inicial y anual con P en el largo plazo no afectó el crecimiento y el rendimiento del cultivo de maíz en el sitio Molisol. Estos resultados podrían deberse a que el contenido



**Figura 1.** Relaciones entre el rendimiento del cultivo de soja y las fracciones de P a 0-20 cm de profundidad del suelo en el Vertisol: a) Bray1-P (mg kg<sup>-1</sup>), b) P total en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pt-Bic) (mg kg<sup>-1</sup>), c) P total en fracción gruesa del suelo (FG) (Pt-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), d) P orgánico en FG (Po-FG) (mg kg<sup>-1</sup>), e) Bray1-P más Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>) y f) P inorgánico en el extracto de NaHCO<sub>3</sub> (Pi-Bic) más Po-FG (mg kg<sup>-1</sup>). Todas las relaciones fueron estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ). Referencias: 0 inicial P 0 anual P = 0 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización anual, 0 inicial P 36 anual P = 0 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización anual, 200 inicial P 0 anual P = 200 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización inicial y 0 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización anual, 200 inicial P 36 anual P = 200 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización inicial y 36 kg P ha<sup>-1</sup> de fertilización anual.



de Bray1-P del suelo de todos los tratamientos estuvo por encima de la concentración crítica calibrada para el maíz en la región pampeana para suelos similares (Sucunza et al., 2018), determinando probablemente la falta de respuesta del cultivo a la fertilización con P. Por otro lado, el cultivo de soja respondió a la fertilización con P (rendimiento, biomasa, concentración de P en grano, P acumulado), probablemente debido a que la mayoría de los valores de Bray1-P en el sitio Vertisol estaban por debajo de las concentraciones críticas a una profundidad de 0-20 cm (Appelhans et al., 2016). En el sitio Vertisol, las variables del cultivo de soja mostraron una mayor correlación con el Pt-Bic que con el Bray1-P (**Tabla 2**). Appelhans et al. (2016) informaron un coeficiente de correlación significativo entre Pt-Bic y el rendimiento de soja y el rendimiento relativo, que aumentó cuando incluyeron el P orgánico y se consideró el Pt-Bic. Estos resultados mostraron que el P orgánico contribuyó a la nutrición fosfatada del cultivo y mejoró la relación con la acumulación de P. Además, Ciampitti et al. (2011) mostraron resultados similares, informando que el Pt-FG estaba relacionado con la acumulación de P por el maíz hasta la floración, en concordancia con nuestros resultados para el cultivo de soja.

El P acumulado se correlacionó de manera similar con el Bray1-P, Pt-Bic y Pt-FG, pero la concentración de P extractable del suelo no es el único factor que controla la acumulación de P en la planta (Barber, 1980; Fixen y Grove, 1990). Además, hay varios factores que influyen en la nutrición de P del cultivo y su impacto en el rendimiento en grano (Barber, 1980; Beegle, 2005), por lo que una correlación similar entre Bray1-P, Pt-Bic y Pt-FG con el P acumulado no implicaría una relación similar con el rendimiento del cultivo.

El Pt-Bic tuvo una relación más estrecha con el rendimiento del cultivo de soja que con el Bray1-P en el sitio Vertisol (**Figura 1**), lo que sugiere que Pt-Bic podría incluirse en los métodos de diagnóstico de fertilidad fosfatada en Vertisoles. Así, en suelos con niveles bajos de Bray1-P, el P disponible para los cultivos provendría también de otras fracciones de P del suelo que no son medidas por el Bray1-P (Sucunza et al., 2018). Por lo tanto, en el sitio Vertisol, una mayor proporción del P acumulado por el cultivo de soja podría haber sido suministrada por fracciones de P inorgánicas y orgánicas lábiles, como el Pt-Bic, que repondrían el P disponible para el cultivo y, en consecuencia, el Pt-Bic resultó un índice más

preciso para evaluar la disponibilidad de P en el Vertisol.

El Pt-FG y el Po-FG se relacionaron mejor con el rendimiento del cultivo de soja que el Bray1-P, pero estos resultados no coincidieron con nuestro trabajo anterior. Appelhans et al. (2016), mostraron que el Pt-FG no estaba relacionado con la respuesta del rendimiento de soja a la fertilización con P, incluyendo suelos con un amplio rango de variación en diferentes fracciones de P, textura contrastante, diferentes cultivos anteriores y condiciones ambientales durante el ciclo del cultivo. A pesar de que el Po-FG se informó como un índice asociado a la mineralización de P orgánico (Wyngaard et al., 2016) y fue sensible a prácticas de manejo, incluida la fertilización con P en el largo plazo, esta fracción de P del suelo no se correlacionó con el P acumulado por el cultivo de soja. Sin embargo, mostró un mayor ajuste con el rendimiento del cultivo de soja que el Bray1-P. La mineralización de las fracciones de P orgánico durante el ciclo de crecimiento del cultivo se esperaba que fuese una fuente importante, pero no la única fuente de P disponible para el cultivo. La fracción de P inorgánico lábil es otra fuente importante de P disponible para un cultivo (Sharpley, 1995).

Para tener en cuenta ambas fuentes de P, proponemos un índice de disponibilidad de P calculado como la suma de Po + Pi lábil. Estos dos índices (Bray1-P + Po-FG y Pi-Bic + Po-FG) mostraron una estrecha relación con el rendimiento del cultivo de soja en el Vertisol, destacando la importancia de considerar las fuentes de P disponibles orgánicas e inorgánicas para los cultivos en los análisis de suelo. Estos índices de disponibilidad de P del suelo fueron más precisos, pero se incrementó la complejidad en las determinaciones de los análisis de suelo de rutina. Así, los próximos desafíos implican desarrollar una metodología simple para en una sola determinación analítica de P incluir las fracciones orgánica e inorgánica lábil.

## Conclusiones

El Bray1-P, el P total en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  y en la fracción gruesa del suelo fueron las fracciones de P que más aumentaron con la fertilización continua con P en el largo plazo en ambos sitios. La fertilización inicial y anual con P en el largo plazo no afectó el crecimiento y el rendimiento del cultivo de maíz en el sitio Molisol debido a los elevados niveles de Bray1-P del suelo.

El P acumulado se correlacionó de manera similar con el Bray1-P, Pt-Bic y Pt-FG para el cultivo de soja en el sitio Vertisol. El P total en el extracto de  $\text{NaHCO}_3$  y el P total y orgánico en la fracción gruesa del suelo se relacionaron más estrechamente con el rendimiento del cultivo de soja que el Bray1-P en el sitio Vertisol. Los índices propuestos que incluyeron el P inorgánico y orgánico lábil, como Bray1-P + Po-FG y Pt-Bic + Po-FG, mostraron una fuerte relación con el rendimiento del cultivo de soja en el sitio Vertisol, estimando la disponibilidad de P del suelo de manera integral. Las fracciones de P que incluyeron al P orgánico lábil mostraron resultados prometedores para mejorar el diagnóstico de fertilidad fosfatada del suelo en cultivos de verano.

## Bibliografía

- Appelhans S.C., R.J. Melchiori, P. A. Barbagelata, y L.E. Novelli. 2016. Assessing organic phosphorus contributions for predicting soybean response to fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 80: 1688-1697.
- Barber S.A. 1980. Soil-plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. En: F.E. Khasawneh; E.C. Sample; y E.J. Kamprath, editores, *The role of phosphorus in agriculture*. ASA, Madison, WI. p. 591-615
- Beegle D. 2005. Assessing soil phosphorus for crop production by soil testing. En: J.T. Sims y A.N. Sharpley, editores, *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, Agron. Monogr. 46. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p. 123-143.
- Boschetti N.G., C.E. Quinteros, R.A. Benavidez y L. Giuffrè. 2003. Cuantificación de las fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos de la Mesopotamia argentina. *Cienc. Suelo* 21:1-8.
- Bowman R.A. 1989. A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:362-366.
- Bray R.H. y L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Cambardella C.A. y E.T. Elliott. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.
- Ciampitti I.A., F.O. García, L.I. Picone y G. Rubio. 2011. Soil carbon and phosphorus pools in field crop rotations in Pampean soil of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:616-625.
- Condon L.M., B.L. Turner y J. Cade-Menun. 2005. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. En: J.T. Sims y A.N. Sharpley, editores, *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, Am. Soc. Agr., Madison, WI. p. 87-121.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Dodd R.J. y Sharpley, A.N. 2015. Recognizing the role of soil organic phosphorus in soil fertility and water quality. *Resources, Conservation and Recycling*. 105 B: 282-293.
- Fixen P. y J.H. Grove. 1990. Testing soils for phosphorus. En: Westerman R.L., editor, *Soil testing and plant analysis*. 3rd edn. Soil Sci. Soc. Am. Book Series, Madison. p. 141-180
- Gee G.W. y J.W. Bauder. 1986. Particle-size analysis. In: A. Klute, editor, *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. Agron. Monogr. 9. 2nd ed. ASA, Madison, WI. p. 383-411.
- Hedley M.J., J.W.B. Stewart y B.S. Chahuan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- Irizar A., A. Andriulo, D. Consentino y C. Amendola. 2010. Comparación de dos métodos de fraccionamiento físico de la materia orgánica del suelo. *Cienc. Suelo* 28: 115-121.
- Kuo S. 1990. Phosphorus. En: *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Serie 5. Madison, WI. p. 869-919.
- McDowell R.W., L. M. Condon y I. Stewart. 2008. An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil. *Soil Biology and Fertility of Soils*. 44: 707-715.
- Picone L., I. Capozzi; E. Zamuner; H. Echeverría y H. Sainz Rozas. 2007. Transformaciones de fósforo en un molisol bajo sistemas de labranza contrastantes. *Cienc. Suelo* 25: 99-107.
- Sharpley A.N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:905-911.
- Sharpley A.N. 1995. Soil phosphorus dynamics: Agronomic and environmental impacts. *Ecol. Eng.* 5:261-279.
- Steffens D., T. Leppin, N. Luschin-Ebengreuth, Z. Yang y S. Schubert. 2010. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173: 765-771.
- Stewart J. y A. Sharpley. 1987. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. En: R. Follet, J. Stewart y C. Cole, editores, *Soil fertility and organic matter as critical components of production systems*. SSSA Spec. Pub. 19. SSSA-ASA. Madison, WI. p. 101-121.
- Sucunza F. A., F.H. Gutierrez Boem, F.O. García, M. Boxler y G. Rubio. 2018. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy* 96:87-95.
- Suñer L.G., J.A. Galantini, R.A. Rosell y M.D. Chamadoira. 2002. Cambios en el contenido de las formas de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana cultivados con trigo (*Triticum aestivum* L.). *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104: 105-111.
- Thien S.J. y R. Myers. 1992. Determination of bioavailable phosphorus in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:814-818.
- Tiessen H. y J.O. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. En: Carter, M.R., editor, *Soil sampling and methods of analysis*. Can. Soc. Soil Sci., Lewis Publ. 293-306.
- Tiessen H., J.W.B. Stewart y A. Oberson. 1994. Innovative soil phosphorus availability indices. Assessing organic phosphorus. En: J.L. Havlin y J.S. Jacobsen, editores, *Soil testing: prospects for improving nutrient recommendations*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. 40, Madison, WI. p. 143-162.
- Van Lierop W. 1990. Soil pH and lime requirements determination. En: R.L., Westerman, editor, *Soil testing and plant analysis*. 3er ed. SSSA Book Ser. 3. SSSA, Madison, WI. p. 73-126.
- Walkley A. y I.A. Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wyngaard N., A. Vidaurreta, H.E. Echeverría y L.I. Picone. 2013. Dynamics of phosphorus and carbon in the soil particulate fraction under different management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:1584-1590.
- Wyngaard N., M. L. Cabrera, K.A. Jarosch y E.K. Bünemann. 2016. Phosphorus in the coarse soil fraction is related to soil organic phosphorus mineralization measured by isotopic dilution. *Soil Biol. Biochem.* 96:107-118. ◀

## ¿Conviene fertilizar con nitrógeno pasturas alfalfa-festuca mediterránea?

Marino, M.A. <sup>(1)\*</sup>, Berone, G.D. <sup>(2)</sup>, Clausen, L. <sup>(3)</sup>, Nuñez Lucanera, M. <sup>(1)</sup> y Giacchino, G.I. <sup>(1)</sup>.

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agrarias - UNMdP. <sup>2</sup>INTA EEA Balcarce. <sup>3</sup>INTA EEA Quimili.  
marino.mariaa@inta.gob.ar

### Introducción

En la región pampeana húmeda, los sistemas ganaderos pastoriles intensivos de producción de carne y de leche requieren un elevado abastecimiento de forraje de calidad buena parte del año. Para ello recurren a las pasturas perennes, un componente fundamental de las cadenas forrajeras en todo el mundo. Esa elevada y uniforme demanda de alimento se contrapone con las marcadas variaciones estacionales en el crecimiento y la producción de estas pasturas. En general, las especies forrajeras templadas presentan altas tasas de crecimiento de forraje en primavera y mínimas en invierno, con producciones intermedias en otoño y verano (Mazzanti et al., 1992). Esto ocasiona marcados desequilibrios entre la demanda y la oferta de forraje, con recurrentes déficits y excesos con respecto a los requerimientos de los animales. Frecuentemente para estabilizar dichos desbalances se recurre al suministro de suplementos forrajeros (como heno, silos o granos), pero su incorporación resulta costosa y reduce los beneficios de los sistemas pastoriles (Hanrahan et al., 2018).

Para atenuar estas fluctuaciones estacionales en la oferta de forraje se utilizan pasturas integradas por más de una especie, las que difieren entre sí en la distribución de la oferta de forraje a lo largo del año. Entre las pasturas utilizadas en los sistemas ganaderos intensivos de la región se destaca la que contiene alfalfa (*Medicago sativa*), valorada por su alta producción estival, y gramíneas templadas como festuca (*Festuca arundinacea* Schreb.) una de las principales forrajeras en la región Pampeana (Scheneiter et al., 2015). En los últimos años se ha difundido una pastura integrada por alfalfa de reposo invernal intermedio (*Alfalfa<sub>GR6</sub>*) y festuca de origen mediterráneo (*Festuca<sub>MED</sub>*) (Scheneiter et al., 2006). Esta mezcla de especies forrajeras presenta una notable asincronía en la distribución del crecimiento de la leguminosa y de la gramínea. La festuca de origen mediterráneo muestra mayores tasas de crecimiento otoño-invernales que la festuca

continental, en cambio en verano la primera presenta tasas de crecimiento menores a las de la segunda. Esto determina que en dicha pastura la producción primavera - estival esté mayoritariamente compuesta por *Alfalfa<sub>GR6</sub>* y la de otoño - invierno por *Festuca<sub>MED</sub>*.

Sin embargo, la disponibilidad de nitrógeno (N) edáfica durante la época fría del año suele ser insuficiente para cubrir el requerimiento de las gramíneas forrajeras templadas, y su deficiencia restringe la producción de forraje (Marino et al., 2004; Agnusdei et al., 2010). La fertilización nitrogenada puede corregir esto, pero su aplicación inadecuada, con desajustes en dosis o momento de aplicación, resulta ineficiente y perjudicial para el ambiente (Chen et al., 2001; Oenema et al., 2015).

Existe abundante información local e internacional sobre el impacto de la fertilización nitrogenada en el crecimiento y la producción de gramíneas forrajeras templadas (García et al., 2002; Agnusdei et al., 2010). Asimismo, se ha estudiado el efecto del momento de aplicación de N sobre la respuesta en la producción de pasturas base gramíneas (Bittman y Kowalenko, 1998; Pereira Serra et al., 2017). Pero son escasos los estudios referidos al impacto del momento de fertilización nitrogenada sobre la producción estacional de pasturas mezcla *Alfalfa<sub>GR6</sub>* - *Festuca<sub>MED</sub>* (Tracy et al., 2016), sin contar con datos al respecto para el Sudeste Bonaerense. Esta información resultaría particularmente valiosa por el elevado contenido de materia orgánica de sus suelos, que lo diferencia de otras regiones ganaderas de la Región Pampeana.

En el presente trabajo se presentan resultados de la acumulación de forraje otoño-invernal (OI) y primavera-estival (PE), la variación estacional en la composición botánica y la eficiencia aparente de uso de N según el momento de aplicación en pasturas *Alfalfa<sub>GR6</sub>* - *Festuca<sub>MED</sub>* en un suelo representativo del sudeste bonaerense.

## Materiales y métodos

El ensayo se desarrolló en INTA EEA Balcarce (37° 45' S, 58° 18' O, 130 msnm) sobre un suelo Argiudol Típico, en una pastura de Alfalfa<sub>GR6</sub> y Festuca<sub>MED</sub> sembrada en abril 2014. El 12/04/2015 se realizó un corte de homogeneización y a partir de allí se evaluaron dos períodos experimentales: 13/04/2015 al 12/04/2016 (P1) y 13/04/2016 al 29/03/2017 (P2). El diseño fue en bloques completos aleatorizados (unidad experimental = 5 m<sup>2</sup>) con tres repeticiones.

Al inicio de cada período experimental se aplicaron 20 kg P ha<sup>-1</sup> para evitar su deficiencia y las dosis de N (aplicadas al voleo bajo la forma de urea, 46-0-0) fueron: sin N agregado (0N), 150 kg N ha<sup>-1</sup> en abril (Nabril), 150 kg N ha<sup>-1</sup> en mayo (Nmayo), 150 kg N ha<sup>-1</sup> en junio (Njunio) y 75 kg N ha<sup>-1</sup> en abril + 75 kg N ha<sup>-1</sup> en agosto (Nabr+ago). Se efectuaron ocho cosechas del forraje en P1 y siete en P2. En cada período experimental se distinguieron las épocas frías (abril a agosto, OI) y cálida (septiembre a marzo, PE). Las cosechas se realizaron cada 560°Cd (temperatura base 4°C y 5°C en OI y PE, respectivamente), que se indican en la **Tabla 1**.

Se calculó el balance hídrico para cada año experimental de acuerdo a Della Maggiora et al. (2003) (**Figura 1a y b**), teniendo en cuenta las lluvias, la evapotranspiración potencial de la cubierta, (ET<sub>0</sub>, asumiendo que no está afectada por el estado nutricional de la pastura) y el contenido de agua disponible en el suelo. Se calculó la evapotranspiración máxima y actual de la cu-

bierta (ETM y ETA) (Allen et al., 1998). Se consideró una profundidad efectiva del suelo de 60 cm. La capacidad total de almacenaje de agua (mm cm<sup>-1</sup>) y agua disponible (mm cm<sup>-1</sup>) fueron calculados utilizando el modelo de Travasso y Suero (1994). El contenido de agua actual en el suelo fue determinado por el balance entre las lluvias y la ETA. El umbral fisiológico fue asumido como 50% del agua disponible. Cuando el contenido actual de agua cayó por debajo de ese umbral, ETA fue menor que la EPM y se consideró déficit hídrico (ETA/ETM < 1).

En cada parcela se cortó a nivel del suelo el material presente en el interior de un marco de 40 x 40 cm, se determinó la composición botánica (Alfalfa<sub>GR6</sub>, Festuca<sub>MED</sub> y material muerto), y los componentes se secaron en estufa a 60°C hasta peso constante. Posteriormente se pesaron y se calculó el porcentaje de materia seca y la acumulación de forraje de la pastura y de cada componente (Alfalfa<sub>GR6</sub>, Festuca<sub>MED</sub> y material muerto) (MS kg ha<sup>-1</sup>).

Se estimó la eficiencia aparente de uso del N aplicado (EUNap, kg MS/kg N aplicado) como la acumulación de forraje Alfalfa<sub>GR6</sub> + Festuca<sub>MED</sub> anual del tratamiento fertilizado menos la del tratamiento sin N, dividido por la cantidad de N aplicado.

El set de datos de los dos años se analizó como experimentos combinados. Se realizó análisis de la varianza y comparación de medias de los tratamientos a través de LSD (P < 0.05), utilizando el paquete estadístico Infostat (Di Rienzo et al., 2008).

**Tabla 1.** Temperatura media diaria del aire promedio, lluvias acumuladas (mm) y radiación incidente media diaria (MJ m<sup>2</sup> día<sup>-1</sup>) para los dos períodos experimentales. Fuente: Agrometeorología, INTA Balcarce.

Períodos de rebrote		Temperatura media diaria (°C)		Lluvias (mm)		Radiación Incidente (MJ m <sup>2</sup> día <sup>-1</sup> )	
P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
13/4-15/5/15	--	15,3	--	92,7	--	9,8	--
16/5-15/6/15	12/4-24/6/16	13,9	10,3	17,0	149,5	6,9	6,4
16/6-28/8/15	25/6-31/8/16	9,9	9,7	262,3	73,2	7,0	8,1
29/8-7/11/15	1/9-28/10/16	11,7	8,0	109,5	118,1	13,9	13,2
7/11-14/12/15	29/10-13/12/16	18,6	18,2	88,3	50,9	20,8	22,4
15/12-8/1/16	14/12-18/1/17	22,8	22,0	11,0	47,8	20,1	23,5
9/1-17/2/16	19/1-20/2/17	22,4	21,8	195,6	143,5	20,3	18,8
18/2-12/4/16	21/2-29/3/17	18,8	20,0	84,9	117,6	16,0	15,9



## Resultados y Discusión

### Producción anual y estacional de forraje

La producción de la pastura difirió significativamente entre P1 y P2 ( $p = 0.0032$ ). Condiciones climáticas disímiles (Tabla 1) pueden explicar en gran medida las producciones de forraje obtenidas en el mismo sitio experimental en años consecutivos. Para el período OI (abril hasta agosto) el clima fue más favorable en P1, con una temperatura promedio diaria 2°C mayor que en el período OI de P2. Para el período PE, las condiciones térmicas fueron semejantes (Tabla 1), pero el déficit hídrico (ETA menor a ETM) fue más pronunciado en P2 que en P1 (Figura 1).

La producción total anual de forraje no fue significativamente afectada por los tratamientos de fertilización nitrogenada ni en P1 ni en P2 ( $p$  valor = 0.294 y 0.536, respectivamente). El

rendimiento promedio anual de forraje fue de 24 912 y 20 803 kg MS ha<sup>-1</sup> en P1 y P2, respectivamente. Estas producciones anuales de forraje se aproximan a las registradas por Schenleiter y Amendola (2009) en el norte de la provincia de Buenos Aires y resultan superiores a las obtenidas localmente por Berardo y Marino (2000). Asimismo, estos rendimientos son mayores a los mencionados para mezclas alfalfa - gramíneas en otras regiones ganaderas templadas del mundo (Tracy et al., 2016).

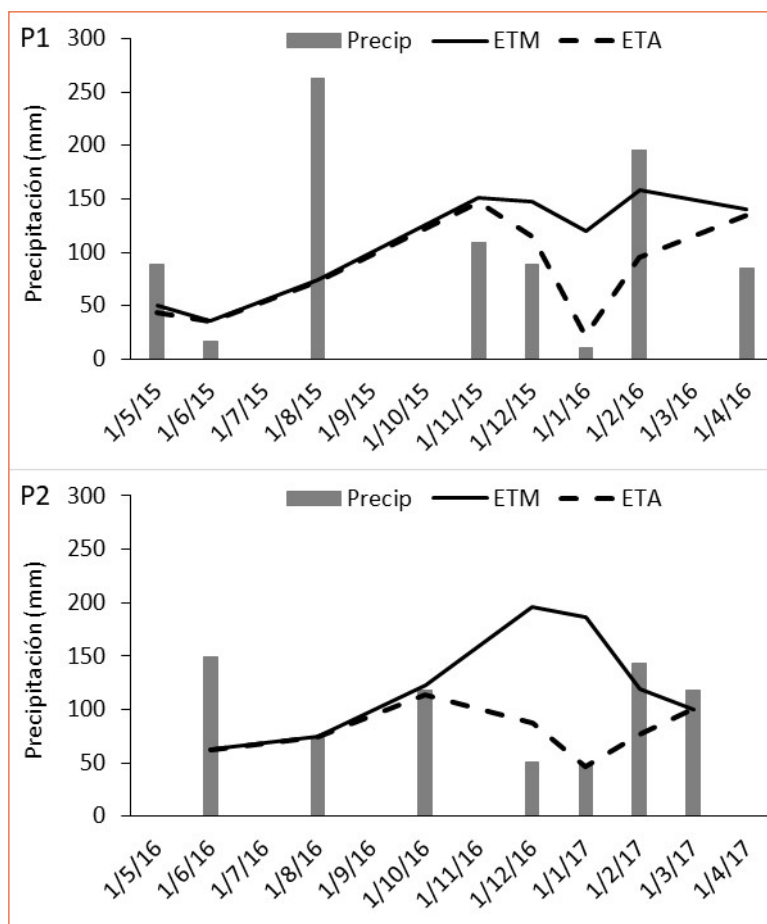
Tanto en P1 como en P2 la producción estacional mostró importantes variaciones entre las estaciones de crecimiento OI y PE (Tabla 2). Consistentemente, en ambos experimentos la mayor acumulación de forraje se registró en el período PE con 18 240 y 16 135 kg MS ha<sup>-1</sup>, lo que representó el 73% y 77% de la producción anual de forraje en P1 y P2, respectivamente. Esta elevada producción se obtuvo en una época con

temperaturas medias del aire de 18°C, alta radiación incidente (Tabla 1) y balances hídricos negativos (ETA menores que ETM) en ambos experimentos (Figura 1). Como se esperaba, en OI las temperaturas medias diarias del aire y la radiación incidente fueron menores a las de PE, mientras que el balance hídrico fue positivo (ETA mayor a ETM) (Tabla 1, Figura 1).

### Composición botánica de la pastura

La producción de forraje reflejó la modificación estacional en la composición botánica de la cubierta, explicada en gran medida por las condiciones ambientales imperantes y por la capacidad de adaptación de las especies a las mismas. Cabe destacar que el porcentaje de material muerto se mantuvo en niveles bajos (menores a 10%) a lo largo de cada año (datos no presentados).

Alfalfa<sub>GR6</sub> y Festuca<sub>MED</sub> expresaron una marcada heterogeneidad temporal en su crecimiento (Figura 2). Esta distinción temporal coincide con lo reportado para alfalfa y festuca creciendo en cubiertas



**Figura 1.** Precipitaciones (mm), evapotranspiración máxima y balance hídrico calculado en base a Della Maggiore et al. (2003) para los períodos P1 y P2. Fuente: Agrometeorología, EEA INTA Balcarce.

puras (Mazzanti et al., 1992; Basigalup, 2007), así como en pasturas consociadas donde se registró esta asincronía en el crecimiento de ambas especies forrajeras (Husse et al., 2016). Esto último les confiere a estas especies forrajeras la capacidad de utilizar eficientemente los recursos del ambiente y reducir la competencia por ellos, en diferentes épocas con condiciones climáticas contrastantes.

En ambos años, la acumulación de forraje PE estuvo dominada por Alfalfa<sub>GR6</sub>, representando el 95% - 97% de la biomasa aérea en la pastura. En cambio, en los períodos OI lo propio se registró con Festuca<sub>MED</sub> (Figura 2). La gramínea representó valores de hasta 97% (con el tratamiento Nabril) de la composición botánica de la pastura desde abril hasta el mes de octubre. Con posterioridad, avanzada la primavera Festuca<sub>MED</sub> disminuyó abruptamente su participación y aumentó la de Alfalfa<sub>GR6</sub>. La situación inversa se

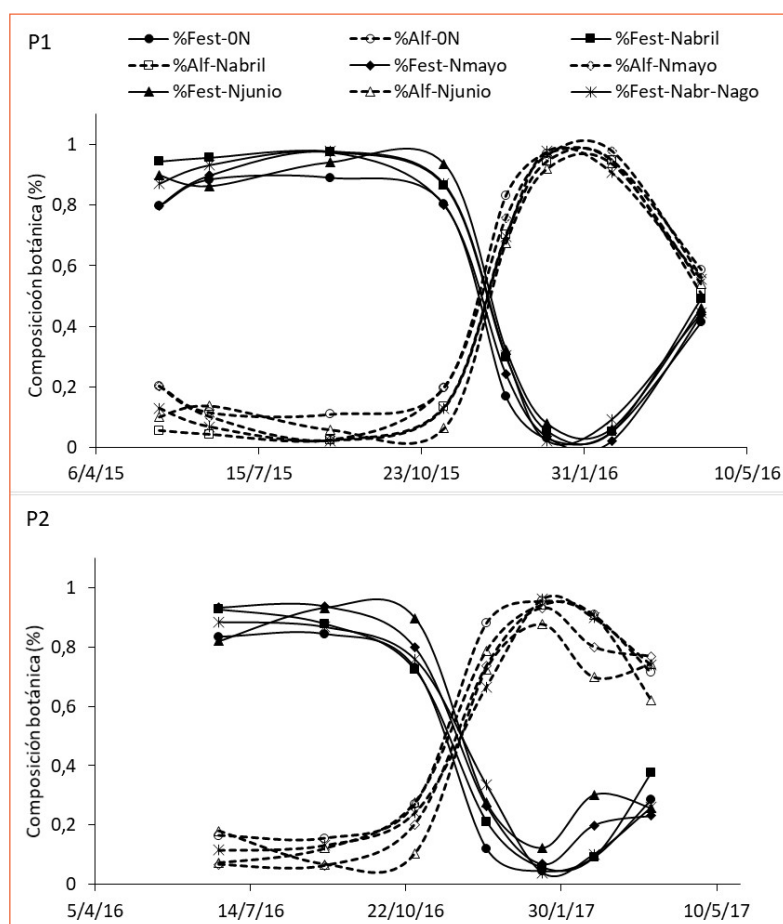
observó en el mes de febrero y marzo, cuando en ambos años declinó la presencia de Alfalfa<sub>GR6</sub> y se incrementó la de Festuca<sub>MED</sub> (Figura 2). Estas tendencias generales se registraron en los dos años independientemente de los tratamientos de fertilización nitrogenada.

Sin embargo, los tratamientos con N tendieron a mostrar una menor y más acotada participación de Alfalfa<sub>GR6</sub> en los períodos PE que el tratamiento 0N, principalmente aquellos que recibieron la aplicación de N avanzado el invierno. Esto último se observó con Nabr-ago en P1 y con Njunio y Nabr-ago en P2 (Figura 2). Asimismo, los tratamientos con fertilización nitrogenada tendieron a manifestar mayor y más sostenida dominancia de Festuca<sub>MED</sub> en OI. A partir del mes de mayo el tratamiento con aplicación de N temprano en otoño (Nabril) presentó más del 90% de participación de Festuca<sub>MED</sub> mientras que 0N al igual que los tratamientos con aplicación de N avanzado el invierno, presentaban un 10% menos proporción de Festuca<sub>MED</sub> en sus cubiertas (Figura 2).

### Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción estacional de forraje

En el período OI, la producción de forraje de la pastura aumentó con la aplicación de N. Este efecto fue significativo en P1 ( $p=0.022$ ), mientras que en P2 se pudo constatar la misma tendencia ( $p=0.064$ ). Contrariamente, la producción de la pastura en el período PE no manifestó diferencias significativas entre tratamientos de fertilización con N en ninguno de los años evaluados ( $p=0.67$  y  $0.61$  para P1 y P2, respectivamente).

Pudo comprobarse que la aplicación de N incrementó significativamente la producción de Festuca<sub>MED</sub> tanto en P1 como en P2 (Tabla 2). En P1 este efecto sobre la gramínea se registró tanto en el período OI como en el PE, mientras que en P2 el incremento observado fue estadísticamente significativo solamente en la época fría OI (Tabla 2).



**Figura 2.** Variación de la composición botánica de la pastura (Festuca<sub>MED</sub> y Alfalfa<sub>GR6</sub>) a lo largo del año en P1 y P2 para cada tratamiento de fertilización nitrogenada.

En Alfalfa<sub>GR6</sub> no se registraron diferencias significativas entre dosis N ni en P1 ni en P2 (Tabla 2), sin embargo, la acumulación de forraje de Alfalfa<sub>GR6</sub> correspondiente a Njunio fue 30% y 33% inferior a la de 0N en P1 y P2, respectivamente. Este efecto depresor sobre la producción de Alfalfa<sub>GR6</sub> fue mínimo para el tratamiento Nabrill (4% y 5%, en P1 y P2, respectivamente) (Tabla 2).

En primavera, con condiciones ambientales favorables ambas especies forrajeras fueron capaces de crecer a altas tasas, pero al inicio de esta estación (septiembre – octubre), sin limitaciones hídricas ni de otros nutrientes, el abastecimiento de N edáfico restringió el crecimiento de Festuca<sub>MED</sub>, tal como se pudo comprobar con el tratamiento 0N en el inicio del período PE. Este efecto fue significativamente significativo en P1. Los resultados obtenidos demuestran que la mayor oferta de N en invierno a partir de los tratamientos de N agregado, permitió expresar tasas de crecimiento de Festuca<sub>MED</sub> relativamente altas durante ese período y en el inicio del período PE. Esto habría provocado una mayor competencia entre Festuca<sub>MED</sub> y Alfalfa<sub>GR6</sub> que con el tratamiento sin aplicación de N. A su vez, este último efecto

habría sido de mayor magnitud con la aplicación de N en junio (Tabla 2, Figura 2).

### Eficiencia de uso del N aplicado

En P1, la respuesta de Festuca<sub>MED</sub> a la fertilización nitrogenada fue en general alta para todos los tratamientos de fertilización nitrogenada (Figura 2), siendo menores los valores registrados en P2. Los valores estimados en P1 son comparables a los reportados en estudios locales con fertilizaciones nitrogenadas en agosto sobre pasturas consociadas (Berardo y Marino, 2000b).

Tal como se mencionó, la menor respuesta a N en P2 puede explicarse en gran medida por las condiciones climáticas. En P1 durante los meses de mayo y junio, período de activo crecimiento de Festuca<sub>MED</sub>, la temperatura media diaria del aire fue 3.6°C mayor que en P2 (Tabla 1).

Teniendo en cuenta la producción anual de forraje de Festuca<sub>MED</sub> en P1 con respecto a P2, las EUNap estimadas en abril o en junio fueron de 37 – 38 kg MS/kg N aplicado, para el tratamiento de N particionado en abril y agosto fue de 40 kg MS/kg N y la menor EUNap en el primer año

**Tabla 2.** Acumulación (kg MS ha<sup>-1</sup>) otoño-invernal (OI) y primavera-estival (PE) de festuca (Festuca<sub>MED</sub>) y de alfalfa (Alfalfa<sub>GR6</sub>) y eficiencias de uso de N de Festuca<sub>MED</sub> (EUNap-Festuca<sub>MED</sub>) y total (EUNap total, Fest<sub>MED</sub> + Alfalfa<sub>GR6</sub>) para cada tratamiento N.

	P1				
	OI Festuca <sub>MED</sub>	OI Alfalfa <sub>GR6</sub>	PE Festuca <sub>MED</sub>	PE Alfalfa <sub>GR6</sub>	EUNap-Festuca <sub>MED</sub>
0N	3834a	523	5911a	12617	
Nabrill	8071 c	328	7261abc	12314	37,2
Nmayo	6958 bc	381	6595ab	9734	25,4
Njunio	5848 b	546	9548 c	8840	37,7
Nabr+ago	6562 bc	308	9121 bc	9256	39.6
P<0,05	0,011	0,21	0,043	0,31	
L.S.D.	1977	265	2553	4877	
	P2				
0N	3004 a	607	3978	13198	
Nabrill	4918 c	563	4921	12539	19.0
Nmayo	5038 c	340	4204	11304	15.1
Njunio	3540ab	504	5333	8909	12.1
Nabr+ago	4409 b	545	5125	11162	17.0
P<0,05	0,036	0,87	0,52	0,53	
L.S.D.	1373	609	2061	5805	

En cada columna valores seguidos con letras distintas difieren significativamente entre sí (p<0,05).

correspondió al mes de mayo con bajas temperaturas y radiación (25,4 kg MS/kg N) (**Figura 2**). Las mayores respuestas obtenidas en P1 fueron semejantes a las registradas en pasturas consociadas (Berardo y Marino, 2000b) y en gramíneas puras para fertilizaciones de salida del invierno (Marino et al., 2004; Agnusdei et al., 2010).

Para P2 en cambio, las EUNap para la producción anual de forraje de *Festuca*<sub>MED</sub> fueron mayores con Nabrill o con aplicación particionada Nabr-Ago (17 y 19 kg MS/kg N aplicado, respectivamente) y menores para las aplicaciones de N en los meses más fríos (N mayo y Njunio). Estos resultados muestran el efecto positivo del agregado de N en la época fría del año incrementando la producción de la gramínea en el período OI.

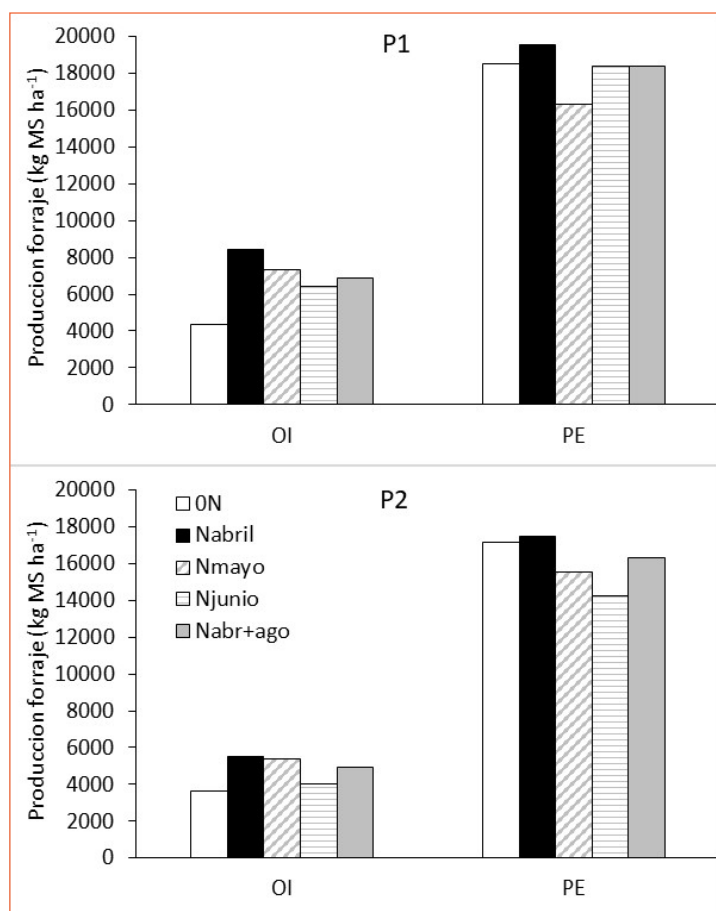
En la **Figura 3** se muestra la producción de la pastura en las épocas OI y PE en cada año. Como se observa, en P1 la aplicación de N en otoño temprano (Nabrill) incrementó la produc-

ción OI de la pastura en 92% con respecto al valor registrado con 0N. En P2, con condiciones climáticas menos favorables para el crecimiento de *Festuca*<sub>MED</sub>, el incremento fue de 52% con relación a la pastura sin agregado de N. En ambos años, este tratamiento (Nabrill) no afectó la producción de forraje en la época PE (**Tabla 2, Figura 3**).

Por otra parte, el agregado de N podría deprimir la producción de forraje de la leguminosa en la época PE. Este sería un efecto no deseado ya que *Alfalfa*<sub>GR6</sub> es la especie responsable del mayor aporte de forraje en la producción anual de la pastura. Consecuentemente, para obtener los mayores beneficios de la aplicación de N en estas mezclas forrajeras de alta producción se debe determinar cuidadosamente el momento de aplicación del N y planificar la utilización del forraje producido.

## Conclusiones

La fertilización con N incrementó significativamente la producción de forraje de *Festuca*<sub>MED</sub>. Este aumento en la participación otoño-invierno-primaveral de *Festuca*<sub>MED</sub> cuando se aplica N en la época fría podría afectar negativamente el crecimiento y producción de *Alfalfa*<sub>GR6</sub> y, consecuentemente, la producción primavero – estival de la pastura. La eficiencia de uso del N aplicado y el impacto sobre la *Alfalfa*<sub>GR6</sub> varió con las condiciones ambientales de cada período y con el momento de fertilización. En ambos años, las ventajas del N agregado fueron mayores con aplicaciones en otoño temprano (Nabrill).



**Figura 3.** Producción otoño-invierno (OI) y primavera-estival (PE) de la pastura para cada tratamiento de fertilización nitrogenada en los dos años evaluados (P1 y P2).



## Bibliografía

- Agnusdei, M.G., S.G. Assuero, F. A. Lattanzi, M.A. Marino. 2010. The use of the nitrogen nutrition index to predict responses to N fertilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 88 (2): 215-230.
- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y D. Smith. 1998. *Crop Evapotranspiration. Guides for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrig. Drain. No. 56. Rome, Italy, pp. 300.
- Basigalup, D.H. 2007. *El Cultivo de la Alfalfa en la Argentina*. Editor: Ing. Agr. (PhD) Daniel H. Basigalup. Buenos Aires. Ediciones INTA, 2007. 479 p. ISBN: 798-987-521-242-8. EEA Manfredi – INTA.
- Berardo, A. y M.A. Marino. 2000a. Producción de forraje de alfalfa bajo diferentes niveles de nutrición fosfatada en el sudeste bonaerense. *Rev. Arg. de Prod. Anim.* Vol 20 (2):93-101. ISSN 0326 – 0550.
- Berardo, A. y M.A. Marino. 2000b. Fertilización fosfatada de pasturas en el sudeste bonaerense. II – Efecto de la aplicación de nitrógeno sobre la respuesta a fósforo. *Revista Argentina de Producción Animal* Vol. 20 (2):113-121.
- Bittman, S. y C.G. Kowalenko. 1998. Whole-season grass response to and recovery of nitrogen applied at various rates and distributions in a high rainfall environment. *Can. J. Plant Sci.* 78: 445-451.
- Chen W., W.P. McCaughey, C.A. Grant y L.D. Bailey. 2001. Pasture type and fertilization effects on soil chemical properties and nutrient redistribution. *Can. J. Soil Sci.* 81: 395-404.
- Della Maggiora, A.I., A.I. Irigoyen, J.M. Gardiol, O. Caviglia y L. Echarte. 2003. Evaluación de un modelo de balance de agua en el suelo para el cultivo de maíz. *Rev. Argent. Agrometeorol.* 2, 167-176.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. González, M. Tablada y C.W. Robledo. 2008. *InfoStat* Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar/>
- García, F., F. Micucci, G. Rubio, M. Ruffo y I. Daverede. 2005. *Fertilización de forrajes en la región Pampeana*. Ed. Fernando Oscar García. Buenos Aires Inpofos Cono Sur, 2005. CD ROM. ISBN 987 20486 -1 -4.
- Hanrahan, L., N. McHugh, T. Hennessy, B. Moran, R. Kearney, M. Wallace y L. Shalloo, 2018. Factors associated with profitability in pasture-based systems of milk production. *J. Dairy Sci.* 101:5474–5485 <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13223>.
- Husse, S. O. Huguenin-Elie, N. Buchmann y A. Lüscher. 2016. Larger yields of mixtures than monocultures of cultivated grassland species match with asynchrony in shoot growth among species but not with increased light interception. *Field Crops Research* 194: 1–11.
- Marino, M.A., A. Mazzanti, S.G. Assuero, F. Gastal, H.E. Echeverría y F. Andrade. 2004. Nitrogen dilution curves and nitrogen use efficiency during winter spring growth of annual ryegrass. *Agronomy Journal* 96: 601-607.
- Mazzanti, A., J. Castaño, G.H. Sevilla y J.R. Orbea, J.R. 1992. Características agronómicas de especies y cultivares de gramíneas y leguminosas forrajeras adaptadas al sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Manual de descripción*. CERBAS. INTA. pp. 32-33.
- Oenema, O., F. Brentrup, J. Lammel, P. Bascou, G. Billen, A. Dobermann, J.W. Erisman, T. Garnett, M. Hammel, T. Hanjotis, J. Hillier, A. Hoxha, L.S. Jensen, W. Oleszek, C. Pallière, D. Powlson, M. Quemada, M. Schulman, M.A. Sutton, H.J.M. Van Grinsven y W. Winiwarter. 2015. EU Nitrogen Expert Panel Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems. Wageningen University, Alterra, PO Box 47, NL-6700 Wageningen, Netherlands. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/Report-NUE-Indicator-Nitrogen-Expert-Panel-18-12-2015.pdf>
- Pereira Serra, A., M.E. Marchetti, E. Dupas, S.C. Encinas y E.R. Pinheiro Lourente, E.F. da Silva, R.G. de Almeida, C.E. Carducci y A.M.T. Alovise. 2017. Best management practices (BMPs) in forage grasses. Chapter 7. En: *New Perspectives in Forage Crops*. Downloaded from: <http://www.intechopen.com/books/new-perspectives-in-foragecrops>.
- Scheneiter, O. y C. Amendola. 2009. Producción de carne en mezclas de alfalfa y festuca con diferente patrón estacional de acumulación de forraje. *Revista Argentina de Producción Animal*. 29:2: 119 – 129.
- Scheneiter, O., J. Carrete, J. y C. Amendola. 2006. Utilización de pasturas de alfalfa-festuca alta, con dos sistemas de pastoreo I. Disponibilidad, composición y digestibilidad del forraje. *Revista de investigaciones Agropecuarias*. 35 (3): 3-18.
- Tracy, B.F., K. Albrecht, J. Flores, M. Hall, A. Islam, G. Jones, W. Lamp, J.W. MacAdam, H. Skinner y C. Teutsch. 2016. Evaluation of Alfalfa-Tall Fescue Mixtures across Multiple Environments. *Crop Sci.* 56:2026–2034. doi: 10.2135/cropsci2015.09.0553.
- Travasso, M.I. y E.E. Suero. 1994. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín técnico* No. 125, Estación Experimental agropecuaria INTA Balcarce. Buenos Aires, Argentina. ◀

# Rotación de cultivos y dinámica de nutrientes en suelos de tambos

Gonzalo Berhongaray<sup>1,2,3</sup>, Amancay Herrera<sup>4</sup>, Roberto Rotondaro<sup>4</sup>, Florencia Gonzalez<sup>5</sup>, María Sol Hernandez<sup>6</sup>, Santiago Moro<sup>3</sup>, Alejandro Palladino<sup>2,3,7</sup>

<sup>1</sup>: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral. <sup>2</sup>: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) <sup>3</sup>: Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA), <sup>4</sup>: Laboratorio SueloFértil, <sup>5</sup>: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), <sup>6</sup>: Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, <sup>7</sup>: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Lomas de Zamora.  
bgonzalo@agro.uba.ar

## Introducción

La lechería argentina, al igual que en otros países del mundo, atraviesa un proceso de intensificación. Entre los mayores cambios se incluye un aumento de la carga animal, un mayor uso de concentrado y anualización de los cultivos forrajeros. Estos recientes cambios podrían impactar sobre la fertilidad de los suelos y consecuentemente sobre la sostenibilidad de la producción (Basanta et al., 2012).

La dinámica de nutrientes en los establecimientos lecheros tiene alta relación con la dinámica de los animales, con los tiempos de permanencia en los lotes donde los animales extraen nutrientes por medio de la alimentación, el tiempo en callejones, sitios de comederos y sala de ordeño, y con el nivel de suministro de alimento externo – concentrado (Herrero et al., 2006; Buron Alfano et al., 2008; Carbó et al., 2014). El balance de nutrientes (ingresos - egresos) es una herramienta sólida para entender el ciclo de los nutrientes a nivel de agroecosistema, y con él se pueden predecir las tendencias futuras de los flujos y se puede evaluar su impacto en el ambiente, así como pueden determinarse prácticas de manejo que incrementen su eficiencia de uso (Herrero, 2007). Los trabajos realizados en la Región Pampeana hasta el momento han sido en general a escala de establecimiento y considerando solo dos nutrientes: nitrógeno y fósforo (Carbó, 2011; Tieri et al., 2014). Sin embargo, la alta dinámica y complejidad de los tambos hace difícil saber cuál es el destino final de los nutrientes dentro del establecimiento. Otros nutrientes como cationes y micronutrientes son importantes para la producción de pasturas, para sanidad y nutrición de los animales y finalmente para la producción de leche.

El análisis de suelos y diagnóstico de la fertili-

dad en sitios con manejos contrastantes permite conocer el efecto acumulado de esas prácticas sobre los contenidos de nutrientes en los suelos. Los objetivos de este trabajo fueron: i) realizar un relevamiento del estado actual de suelos de tambos en las principales cuencas lecheras, ii) generar una herramienta de balances de nutrientes en el suelo de distintos sistemas de tambos para entender cuál es su dinámica, cuánto se pierde y cuánto finalmente se recicla, y iii) comparar datos simulados con el balance y datos medidos en suelo. Este trabajo preliminar se enmarca dentro del Proyecto Rotaciones en Tambo de CREA que intenta responder cuál es el efecto de las distintas rotaciones sobre la sostenibilidad del recurso suelo.

## Materiales y Métodos

### Muestreo de suelos

Se diseñó un relevamiento para obtener muestras de suelo en establecimientos de las principales cuencas lecheras de la Región Pampeana. El mismo se realizó a partir de encuestas a productores y asesores lecheros CREA. Mediante estas encuestas se determinaron 5 situaciones de muestreo para comparar el efecto del manejo sobre los suelos de los tambos: pasturas nuevas, pasturas implantadas, piquetes para suplementación de los animales, lotes agrícolas y parques (sin actividad productiva). Se muestrearon dos tipos de pasturas, recién implantadas y con tres o más años de implantación. Las mismas eran pasturas de alfalfa pura o consociadas con gramíneas perennes. Estas pasturas eran consideradas dentro de la rotación forrajera normal del tambo. No se consideraron en esta categoría pasturas de larga duración o que se renuevan permanente-

mente como pasturas de agropiro (*Thynopiron sp.*, *Agropyron sp.*), promociones de ryegrass (*Lolium multiflorum*), etc. por considerarse en general lotes de menor aptitud y que no entran usualmente en la rotación de cultivos del tambo. Los piquetes representan lugares de acumulación de ganado, encierres, comederos, nocheros, etc. Son sitios que por varios años reciben altas concentraciones de animales y de excreta y rara vez se cultivan. Los lotes agrícolas eran lotes fuera de los tambos y representativos de la historia y modalidad de agricultura más común de la subregión. En ellos se mantenía la rotación típica del lugar. Los parques de los establecimientos se tomaron como los sitios menos disturbados o sitios control, los mismos nunca habían sido cultivados ni usados como corrales según la memoria de los dueños o encargados del establecimiento, lo que nos daba la seguridad de no cultivo en por lo menos los últimos 70 años. En los parques se eligieron ubicaciones de muestreo que estuvieran lejos de las construcciones y caminos. Entre agosto y septiembre de 2018 se muestrearon 17 establecimientos distribuidos en las 3 principales cuencas lecheras: Abasto, Oeste (9 de Julio, Trenque Lauquen y zona) y Centro (centro de Santa Fe y Córdoba) tomando muestras de suelo, agua de bebida y leche.

En 10 de los establecimientos se eligieron 5 sitios representativos de los tipos de uso del suelo, y en ellos se tomaron muestras cada 20 cm hasta los 60 cm de profundidad. De cada estrato de profundidad se tomaron 5 muestras de suelo que se compusieron para generar una muestra por estrato. En los 7 establecimientos restantes las muestras fueron tomadas solo en la capa superior de suelo (0-20 cm) y se duplico el número de lotes de pasturas muestreados, manteniéndose el muestreo en parques, lotes agrícolas y piquetes. En dos de estos establecimientos, de mayor tamaño, fue posible realizar una transecta de muestreo desde la sala de ordeño o tambo hasta el lote mas alejado. Cada sitio fue además georreferenciado. Las muestras de suelo fueron enviadas al laboratorio SUELOFERTIL para la determinación de materia orgánica (MO; Walkey y Black), pH (1:2.5, suelo:agua), conductividad eléctrica (CE; 1:2.5, suelo:agua), capacidad de intercambio catiónico (CIC; acetato de amonio 1N, Titulometría), nitrógeno total (N; Kjeldahl), fósforo extractable (P; Bray y kurtz I), azufre de sulfatos (S-SO<sub>4</sub>; turbidimetría), bases de intercambio (Ca, Mg, K, Na; acetato de amonio 1N, Lectura con

espectrofotómetro de abs/emisión atómica), cobre (Cu) y cinc (Zn; ext.con DTPA-Lectura con espectrofotómetro de absorción atómica). Las muestras de agua y de leche fueron tomadas en recipientes plásticos limpios y previamente enjuagados con la propia agua o leche, congelados y enviados al Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la CNEA en donde se determinó contenidos totales de P, S, Ca, Cu y Zn.

En cada tambo se registró el manejo desde el año 2000 hasta el 2018 considerando: superficie de tambo, numero de vacas en ordeño y totales, peso de los animales, producción de leche, nivel de suplementación, superficie dedicada a cada cultivo, fertilizaciones y producción o rendimientos.

### Balances de nutrientes

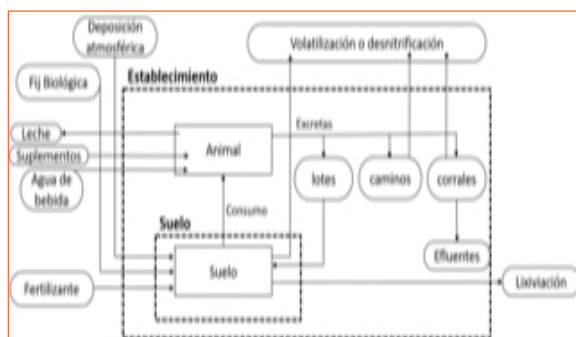
Para la realización de los balances se utilizó como base un tambo promedio que surge de los manejos relevados en la campaña de muestreos. Se realizaron los balances para cada año teniendo en cuenta los cambios ocurridos en el sistema: rotaciones, niveles de carga de vacas totales (VT), niveles de consumo de concentrado por parte de las vacas de ordeño (VO) y niveles de producción. La producción de cada recurso forrajero fue obtenida de valores promedios reportados y la precipitación media utilizada fue de 900 mm. Para cada escenario planteado para cada año se realizaron balances a escala de establecimiento y de lote (**Figura 1**), este último es una conjunción de balances a escala de predio y del rodeo de ordeño. Para los balances se consideró nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg), cobre (Cu), cinc (Zn) y sodio (Na).

El ingreso de nutrientes se computó a partir de la cantidad de fertilizantes utilizada (Proyecto Rotaciones en Tambo CREA), así como de concentrados y alimentos externos, del aporte atmosférico (fijación biológica de nitrógeno FBN y deposición de nutrientes; Álvarez et al., 2016) y el consumo de agua de bebida por parte de los animales y la concentración de cada nutriente en el agua. También se consideraron los nutrientes extraídos por las plantas según requerimientos (IPNI, 2013) y cosechados por los animales según una eficiencia de cosecha que varía según la carga animal (Baudracco et al., 2013). Las pérdidas por volatilización, desnitrificación y lixiviación

de nitrógeno se calcularon según metodología IPCC (IPCC, 2006). Para el cálculo de lixiviación de otros nutrientes se realizó una revisión bibliográfica (Di y Cameron, 2004; Monaghan et al., 2005).

Se calculó la cantidad excretada de cada nutriente como la diferencia entre la cantidad consumida (agua, suplemento y forraje) y la cantidad exportada en la leche (análisis de leche y revisión bibliográfica). El tiempo de actividad de los animales (16 h) se dividió entre tiempo en la sala de ordeño y corrales (3 h por día), el tiempo en encierre (silo) y tiempo en los lotes para pastoreo (pasturas y verdeos). El tiempo de ocupación de encierre y cada lote se calculó en función de la disponibilidad de MS que cada uno ofrecía, y en función del tiempo se ponderó la proporción de las excretas en cada sector del establecimiento. Para los contenidos de nutrientes en leche, en alimentos, en agua de bebida, lixivaciones y deposiciones atmosféricas se realizaron revisiones bibliográficas y se encuentran disponibles por pedido al primer autor del presente trabajo.

Se compararon las salidas del modelo de balance y los datos de los muestreos de suelo para evaluar si el modelo es capaz de simular las tendencias de los balances de nutrientes en dirección (positiva o negativa) y magnitud. Para ello se calculó la diferencia entre los stocks de nutrientes en los suelos de los lotes de pastura y los parques, utilizando densidades aparente medias de suelos para cada capa (Berhongaray et al., 2013) y multiplicando por el contenido de nutriente analizado. Cabe resaltar que este cálculo representa sólo cambios en las fracciones analizadas (extractables) y no totales como sí el balance.



**Figura 1.** Representación de los balances de nutrientes a nivel de establecimiento y de lote o suelo.

## Resultados y Discusión

### Análisis de suelos

Se encontraron disminuciones en los contenidos de las variables edáficas tanto en suelos de tambo como de agricultura (**Figura 2**). Las disminuciones más importantes se encontraron en P, Zn y K. Los parques tuvieron en promedio 122 ppm de P en la capa de 0-20 cm, mientras que en los lotes de tambo el promedio fue de 47 ppm. Si bien esta caída es importante en magnitud, representa un nivel relativamente alto considerando niveles críticos de entre 15 y 25 ppm P para cultivos de tambo como maíz y alfalfa (García et al., 1999). Las caídas en los niveles de P fueron significativas hasta los 60 cm de profundidad. Distintos estudios realizados demuestran que los tambos tienen balances positivos de P, de entre 10 y 15 kg ha<sup>-1</sup> de P por año, pero esto ocurre a nivel de todo el establecimiento (Carbó, 2011; Tieri et al., 2016). En cambio, cuando se analizaron los suelos de piquetes o zonas de alimentación, se encontró altos contenidos de P y otros nutrientes (**Figura 3**).

Las bases y los micronutrientes también sufrieron caídas importantes en sus niveles (**Figura 2**) del orden de 20% a 40%, de las cuales el K y el Mg terminan acumulándose en gran parte en los sitios de concentración de animales (**Figura 3**). El Ca, sin embargo, parece tener un destino fuera del tambo, junto con la salida de leche del sistema, ya que es mucho menor su presencia en los sitios de concentración. De igual manera se encontró que las fuertes caídas de Zn a nivel de suelos no fueron compensadas por mayor concentración en piquetes (**Figuras 2 y 3**).

Fue posible encontrar un patrón de niveles de nutrientes en función de la distancia del lote al tambo o sala de ordeño (**Figura 4**). El nivel de P, K, Cu y Zn disminuyó con la distancia a la sala, mientras que en otros nutrientes o propiedades del suelo no se encontraron tendencias. Este patrón puede deberse a que a menor distancia los animales pasan más tiempo en los lotes y menos en los caminos, y en consecuencia hay un mayor retorno de nutrientes por excreta. Algo similar se encontró al agrupar los tambos por porcentaje de pasturas en la superficie (**Figura 5**). Tambos con mayor proporción de pasturas tenían menores diferencias en el contenido de P, K y Zn respecto a los parques, mientras que en



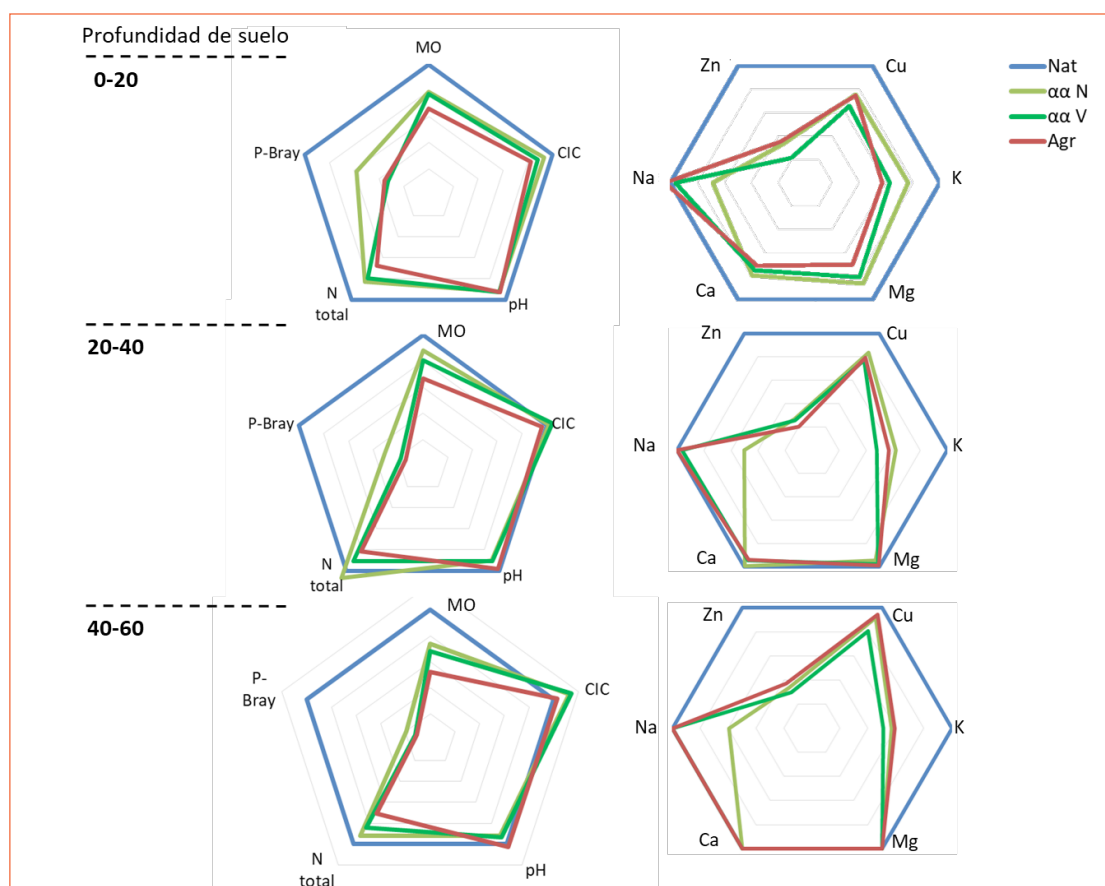
otros nutrientes no se encontró un patrón. A mayor proporción de pasturas, más tiempo ocupan los animales pastoreando en los lotes y devolviendo nutrientes mediante excretas.

### Balances de nutrientes

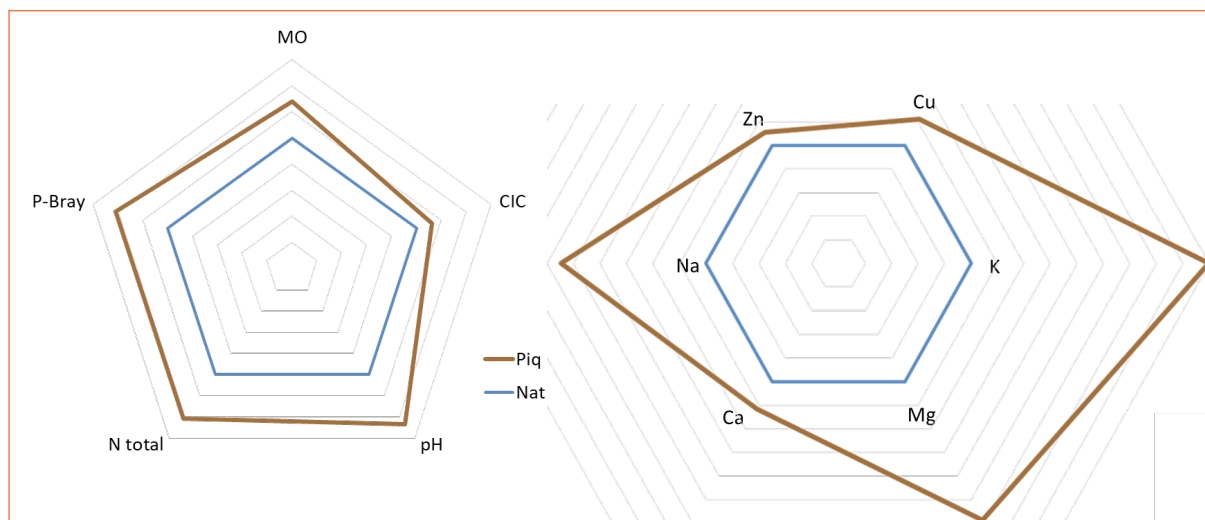
Los niveles de carga animal, nivel de concentrado y producción individual de leche de los tambos muestreados aumentó durante el periodo considerado (Tabla 1). Sin embargo, no se encontraron cambios importantes en el porcentaje de ocupación de los cultivos, siendo en promedio una ocupación del 60% por pasturas perennes. El proceso de intensificación queda dado por aumentos del 100% en el caso de la carga y nivel de concentrado y aumentos del 20% en la producción individual de leche, lo que

se traduce en aumentos de casi 2.5 veces la producción de leche por hectárea. Esto produce cambios en la recirculación de nutrientes dentro de los establecimientos lecheros.

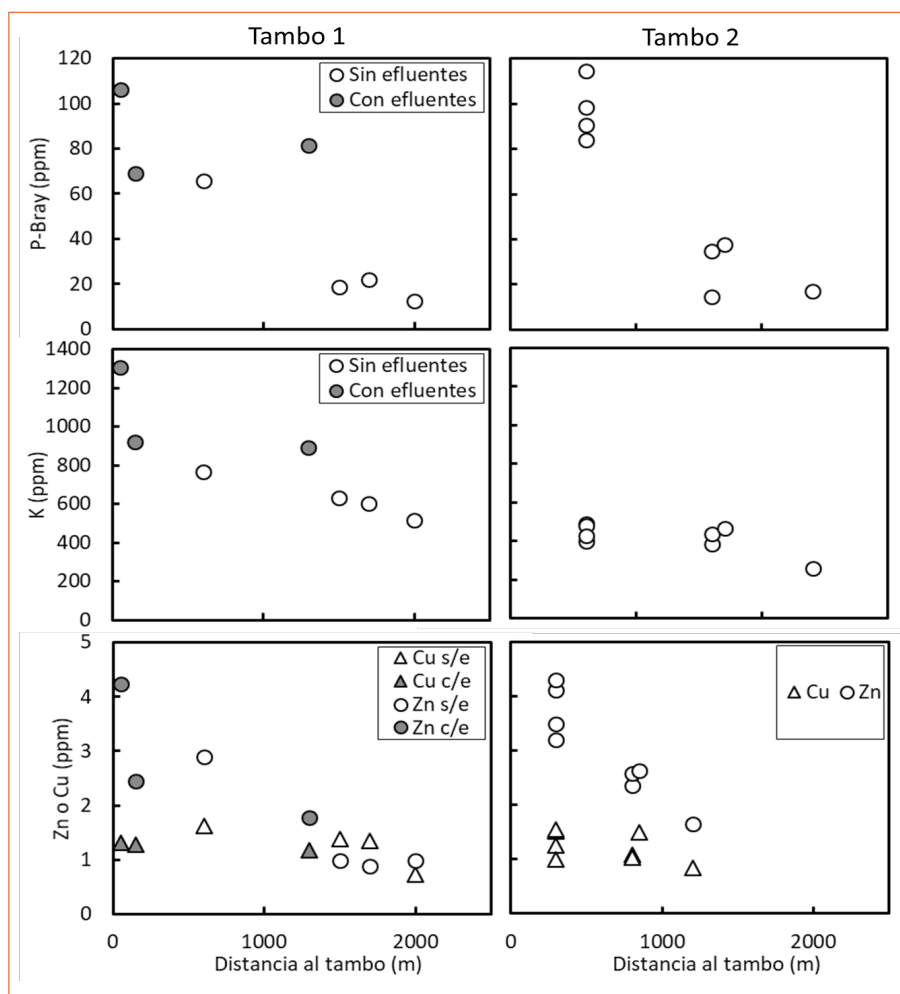
En general, los balances de nutrientes tendieron a ser más positivos en el tiempo, a medida que la carga, nivel de concentrado y producción aumentaron, exceptuando Zn para el cual los balances fueron siempre muy negativos tanto a nivel de establecimiento como en los lotes (Figura 6). En el caso de S, Ca y K, los balances fueron positivos a escala de establecimiento, pero fueron negativos en los lotes. Esto significa que la acumulación de nutrientes en sala de ordeño, caminos y encierres fue importante, revalorizando el potencial uso de los efluentes como fertilizantes.



**Figura 2.** Comparación de los valores de las variables edáficas determinadas a diferentes profundidades (0-20, 20-40, 40-60) en los parques (línea azul), pasturas nuevas (verde claro), pasturas implantadas (verde oscuro) y agrícolas (línea roja). MO= materia orgánica, P-Bray.= fósforo extractable, N-total.= concentración de nitrógeno total, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Zn= cinc extractable, Cu= cobre extractable, K= potasio extractable, Mg= magnesio extractable, Ca= calcio extractable, Na= sodio extractable.



**Figura 3.** Comparación de los valores de las variables edáficas determinadas en la capa de 0-20 cm en los parques (línea azul) y piquetes (línea marrón). MO= materia orgánica, P-Bray.= fósforo extractable, N-total.= concentración de nitrógeno total, CIC= capacidad de intercambio catiónico, Zn= cinc extractable, Cu= cobre extractable, K= potasio extractable, Mg= magnesio extractable, Ca= calcio extractable, Na= sodio extractable.



**Figura 4.** Niveles de nutrientes en los lotes en función de la distancia al tambo o sala de ordeño de dos tamboos muestreados. En puntos grises oscuros lotes en donde se habían realizado aplicaciones de efluentes del tambo (purines).

En el caso de N, los mayores ingresos se debieron a la FBN. Para el cálculo de FBN se utilizó un coeficiente fijo que relaciona kg N fijado por kg MS producida, que quizás no represente las situaciones reales a campo. En varios de los establecimientos visitados encontramos fallas en la nodulación en alfalfas recién implantadas, y se encontró una asociación positiva entre nodulación de las alfalfas y la relación Ca/Mg (datos no presentados). Deberían ajustarse los cálculos de FBN en función de variables ambientales o de suelo que permitan mejorar los balances. Gran proporción de los ingresos de N se perdió por vías de volatilización, desnitrificación y lixiviación en todos los modelos planteados. Estas pérdidas

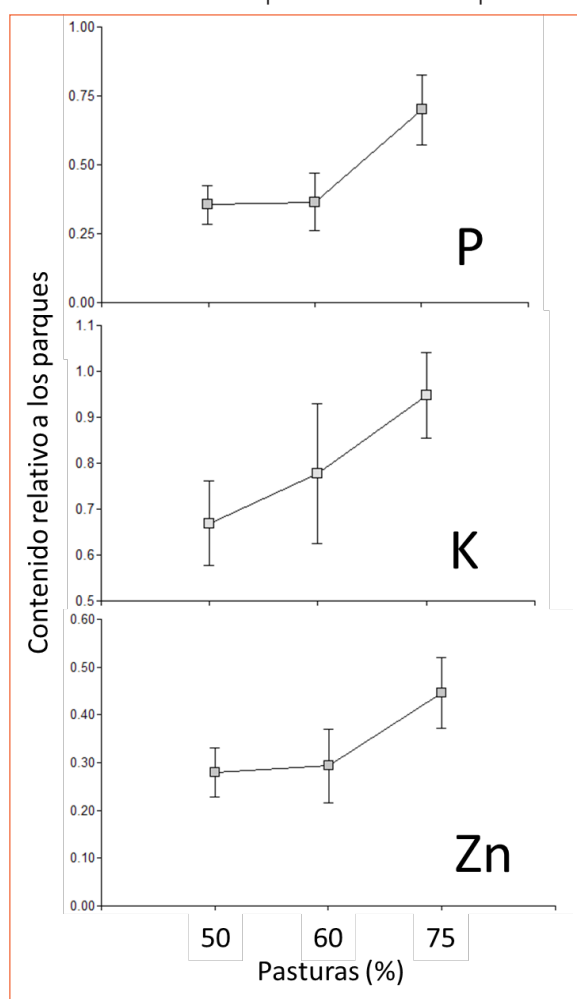
también son estimadas con coeficientes fijos y en función de las entradas de N en kg por hectárea (IPCC, 2006). Sin embargo, las excretas animales no se distribuyen uniformemente en la superficie, sino que adquieren mayor concentración en el lugar de deyección, por lo que las pérdidas deben ser aun mayores que las estimadas. Nuevos coeficientes, específicos para excretas son necesarios para los balances de N en tambos.

Para el caso de Ca y Mg, la relación Ca:Mg de los alimentos fue de 2:1, mientras que la exportada en la leche fue 12:1, esto significó que relativamente poco Mg es exportado y mayoritariamente es excretado. Lo contrario ocurre con el Ca donde el balance acumulado mostró grandes pérdidas de este nutriente (Figura 7). El balance general de cationes dio negativo solo en planteos de muy baja proporción de pasturas. Las pérdidas de cationes y la alta entrada de N, así como su pérdida por lavado, son fenómenos que pueden desencadenar la acidificación de los suelos y comprometer la productividad de los suelos en el largo plazo (Rengel, 2003). En los muestreos observamos caídas en los niveles de pH en suelos de tambo.

Los balances estimados para N y P (positivos) no reflejaron los valores medidos en los suelos (negativos). En el caso del N, la posible sobre-estimación de la FBN y la sub-estimación de las pérdidas en los modelos de podrían ser las causas de estas diferencias. En el caso del P, si bien los balances son positivos, se observa que en los inicios de la serie (año 2000), los balances eran cercanos a la neutralidad y quizás en periodos anteriores fueran negativos. Además, la fracción evaluada corresponde al P extractable y su contenido en el suelo puede deberse también a los cambios en el pH medidos. Los cationes Mg y Na tampoco

**Tabla 1.** Evolución de la carga animal (vaca total por hectárea), nivel de concentrado en la dieta de vacas de ordeño ( $\text{kg VO}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) y producción individual de leche ( $\text{l VO}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ), valores promedios en los tambos muestreados.

Año	Carga ( $\text{VT ha}^{-1}$ )	Concentrado ( $\text{kg MS VO}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )	Producción ( $\text{l VO}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )
2000	0.98	3	18.7
2005	1.35	4.3	20.5
2010	1.57	5.6	22.2
2015	1.95	7.7	22.7
2018	1.79	7.2	22.3



**Figura 5.** Contenidos relativos de nutrientes en suelos bajo pasturas respecto a los parques en función de la superficie ocupada con pasturas. Los tambos fueron agrupados en tres categorías: 50, 60 y 75% de la superficie con pasturas. P= fosforo extractable, K= potasio extractable, Zn= cinc extractable.

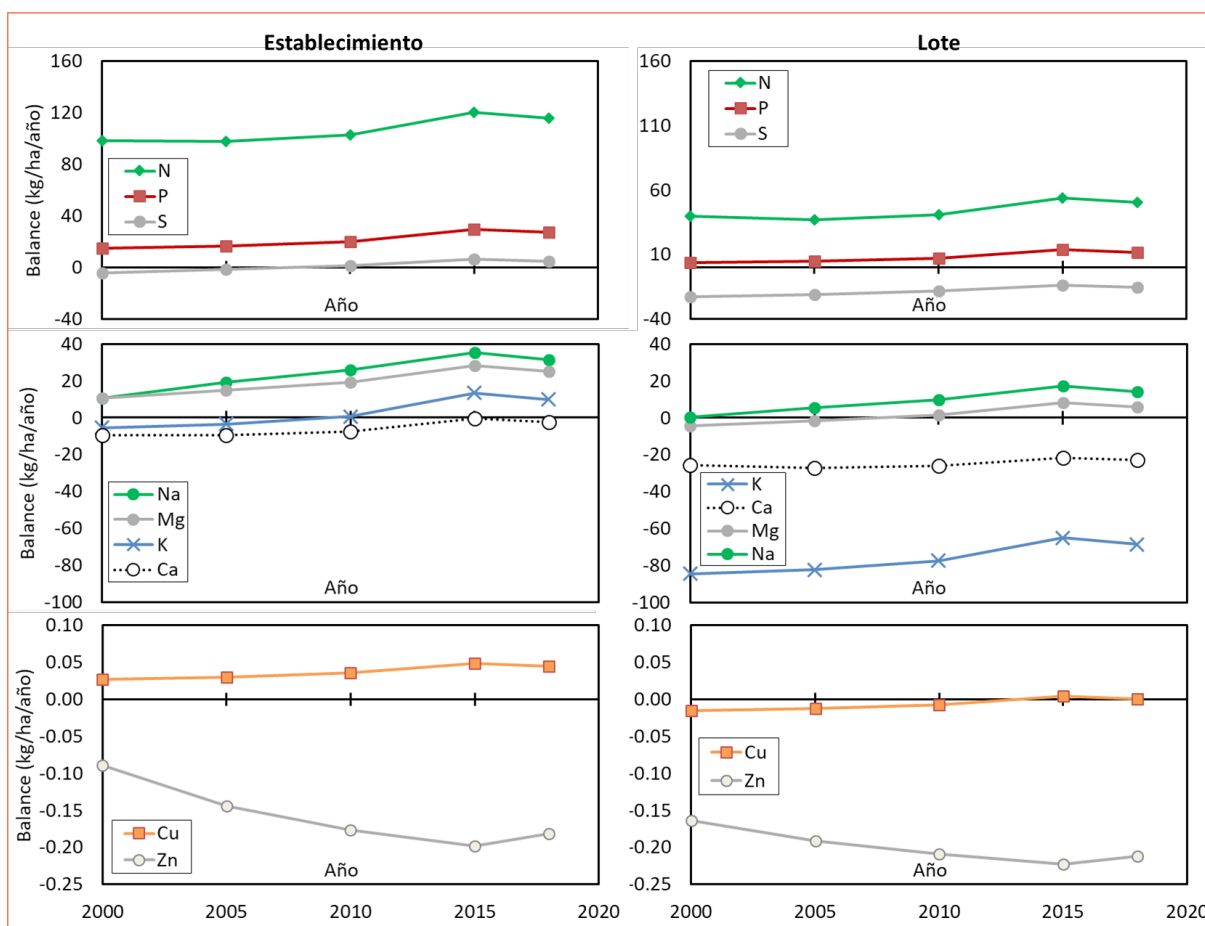
fueron bien representados en el balance (Tabla 2), hipotetizamos que las pérdidas de estos nutrientes por lixiviación son más importantes que las estimadas por el balance. Consideramos que las tendencias en los cambios de stock para K, S, Ca, Cu y Zn fueron bien representadas en el modelo de balance (Tabla 2).

## Conclusiones

Nutrientes poco explorados en los estudios de balances de nutrientes en tambos fueron los que presentaron más desbalances. Los balances de N y P fueron positivos, pero los contenidos de estos nutrientes fueron menores a los sitios control, e incluso similares a los lotes agrícolas de las zonas. Este estudio remarca la importancia de considerar otros nutrientes incluyendo micronutrientes y observar con detalle relaciones de cationes como Ca/Mg, y balances de cationes y aniones que pueden influir a futuro en el pH de los suelos.

Nutriente	Balance (kg ha <sup>-1</sup> )	ΔSuelo (kg ha <sup>-1</sup> )	Tendencia
N	755	-1487	No
P	124	-189	No
K	-1405	-633	Si
S	-346	-5	Si
Ca	-458	-946	Si
Mg	9	-109	No
Cu	0	-1	Si
Zn	-4	-13	Si
Na	141	-61	No

**Tabla 2.** Balance de nutrientes (kg ha<sup>-1</sup>) estimados para el periodo 2000-2018 en un tambo promedio, y diferencia de contenido promedio de nutrientes entre parques y lotes de tambo (ΔSuelo, kg ha<sup>-1</sup>, 0-60 cm). N= nitrógeno, P= fósforo, K= potasio, Mg= magnesio, Ca= calcio, Zn= cinc, Cu= cobre, Na= sodio. Salvo N, los nutrientes representan las fracciones extractables y no los contenidos totales.



**Figura 6.** Balance de nutrientes anual (kg ha<sup>-1</sup>) para el establecimiento (izquierda) y para los lotes (derecha).



## Agradecimiento

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto Rotaciones en Tambo de AACREA y la Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA). Agradecemos a los miembros CREA de los tambos muestreados, así como a los coordinadores y asesores CREA de cada zona.

## Bibliografía

- Alvarez R., H.S. Steinbach y J.L. De Paepe. 2016. Historical balance of nitrogen, phosphorus, and sulfur of the Argentine Pampas. *Ciencia del suelo*, 34: 231-244.
- Basanta M.V., VS Faggioli; LS Peirone; CI Milán; C Cesaretti; E Bonadeo & MB Aimetta. 2012. Intensificación de los sistemas de producción lechera y sus efectos sobre el suelo. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Baudracco, J; N Lopez-Villalobos; CW Holmes; EA Comeron, KA McDonald & TN Barry. 2013. *Animal* 7: 870-878.
- Berhongaray G., R. Alvarez, J.L. De Paepe, C.

Caride y R. Cantet. 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma*, 192, 97-110.

Buron Alfano, V.; Orlando, A.; Orliacq, B.; Nielsen, A.; Flores, M.; Herrero, M.A. y Charlón, V. 2008. Evaluación de estrategias de alimentación en relación con la utilización de nitrógeno y fósforo en rodeos lecheros. *Revista Argentina de Producción Animal*. 28: 309-310.

Carbó, L. I. 2011. Balances de nutrientes como herramienta para estimar el potencial para el reciclado de los efluentes de tambo en recursos forrajeros (Tesis de la Especialidad en Manejo de Sistemas Pastoriles Facultad de Agronomía- UBA).

Carbó, L.; Charlón, V.; Herrero, M.A. y Cuatrin, A. 2014. Balance de fósforo en tambos y su relación con indicadores de estructura y de manejo. *Revista Argentina de Producción Animal*. 34: 217

Di, H.J.; K.C. Cameron. 2004. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on potassium, magnesium and calcium leaching in grazed grassland. *Soil Use and Management*. 20: 2-7

García F., M. Rufo y I. Davedere. 1999. Fertilización de pasturas y verdeos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 1: 2-11.

Herrero M.A. 2007. Balances de nutrientes en tambos: el valor de los residuos. Programa de Capacitación de la Mercoláctea. 6p.

Herrero, M. A.; Gil, S.B.; Sardi, G.M.; Flores, M.C.; Carbó, L.I.; Orlando, A.A. 2006. Transferencia de nutrientes del área de pastoreo a la de ordeño, en tambos semiextensivos en Buenos Aires, Argentina. *In Vet*. 8: 23-30

IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Fecha de consulta: 20/03/2017

IPNI. 2013. CalcRec. Disponible en: <http://lacs.ipni.net/>. Fecha de consulta: 5/03/2017.

Monaghan, R.M.; R.J. Paton; L.C. Smith, J.J. Drewry y R.P. Littlejohn. 2005. The impacts of nitrogen fertilization and increased stocking rate on pasture yield, soil physical condition and nutrient losses in drainage from a cattle-grazed pasture, New Zealand Journal of Agricultural Research. 48: 227-240.

Rengel, Z (Ed). 2003. Handbook of soil acidity. CRC Press. New York. 512p.

Tieri, M.P., Pece, M., Comerón, E.A., Maciel, M., Scándolo, D., Castignani, H., Salado, E., Romero, L., Berca, R., Vera, M., Herrero, M.A., Charlón, V. y García, K. 2014. Evaluación de la sustentabilidad de un tambo de alta productividad con especial énfasis en los aspectos ambientales. INTA Rafaela. Publicación Miscelánea 2. 31p. ◀

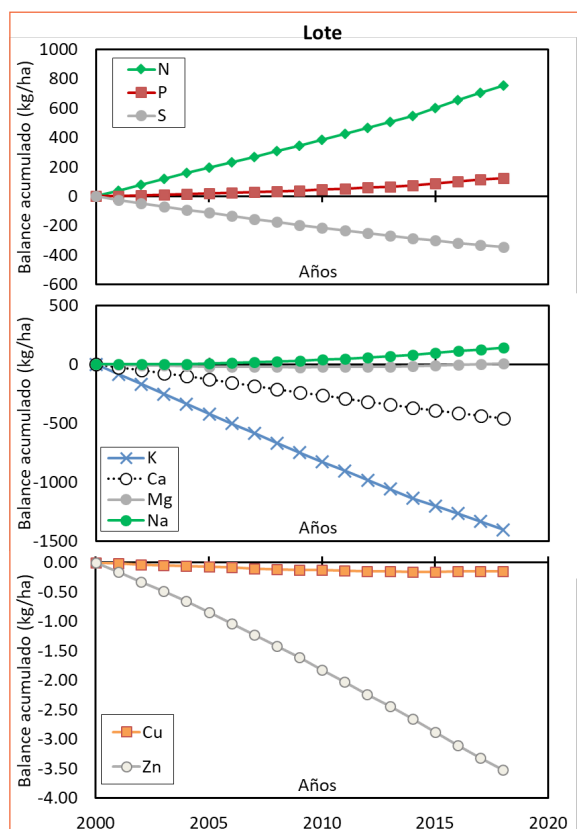


Figura 7. Balance de nutrientes acumulado para el periodo 2000-2018.

# Fertilización NS en trigo pan: Incidencia en las respuestas del peso y la calidad del grano a las condiciones de llenado

Agustín F. Arata<sup>1</sup>, Deborah P. Rondanini<sup>2</sup>, Gabriela E. Tranquilli<sup>3</sup>, Adriana C. Arrigoni<sup>1</sup>

Gonzalo Pizarro<sup>1</sup>, Emilio A. Moris<sup>1</sup> y Laura Lázaro<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Facultad de Agronomía, UNICEN

<sup>2</sup>CONICET - FAUBA

<sup>3</sup>IRB, CIRN, INTA

arataa@faa.unicen.edu.ar

## Introducción

El diseño de prácticas de manejo en el cultivo de trigo se orienta a alcanzar diferentes objetivos de producción, incluyendo la obtención de productos con una determinada calidad, compatible con niveles de rendimiento que aseguren la rentabilidad de la actividad (Miralles et al., 2010; Rondanini et al., 2012). La calidad del grano puede definir su valor agregado y/o su facilidad de comercialización, dependiendo del contexto económico imperante. La aptitud panadera del trigo pan, que define su calidad industrial, es un atributo multidimensional determinado por características genotípicas, estructurales del grano y de las reservas que almacena en el endosperma, especialmente almidón y proteínas (Peña et al., 2002). Las proteínas del grano de trigo pueden clasificarse en solubles en soluciones acuosas: albúminas y globulinas, e insolubles: gliadinas y gluteninas. Estas últimas representan aproximadamente el 80-85% del total y son las que forman el gluten durante el amasado y confieren las características viscoelásticas a la masa durante la panificación (Shewry, 2009).

La disponibilidad de nutrientes durante el ciclo del cultivo, como el nitrógeno (N) y el azufre (S), afecta los procesos que regulan el crecimiento, la generación del rendimiento y la calidad de los cultivos de granos. A medida que avanza el desarrollo de los mismos se producen cambios en la demanda de estos nutrientes que, de no ser satisfecha, puede resultar determinante en la definición del rendimiento al reducir la tasa de crecimiento, especialmente en las etapas críticas, y en la calidad de los granos (Dreccer et al., 2003).

Tanto el tamaño como la actividad de la fuente, considerada como un tejido productor neto de fotoasimilados (Ho, 1988; Sonnewald

y Fernie, 2018), determinan la capacidad del cultivo para acumular biomasa, regulando los procesos de intercepción de radiación y su eficiencia de conversión (Dreccer et al., 2003). Por su parte, los destinos son considerados tejidos importadores netos de productos fotosintéticos (Ho, 1988; Sonnewald y Fernie, 2018). Así, para un cultivo productor de granos como el trigo, la capacidad de los destinos está dada por el número (cantidad) y el peso (tamaño) de los granos. Estos componentes que determinan el rendimiento del cultivo se incrementan con la absorción de macronutrientes limitantes, tales como el N y, en menor medida, el S (Dreccer et al., 2003).

En las condiciones de producción de nuestro país, son frecuentes las restricciones bióticas y/o abióticas que limitan la actividad de la fuente fotosintética y consecuentemente la disponibilidad de asimilados, determinando el crecimiento del cultivo y su partición entre los diferentes órganos. Una mejor comprensión de la respuesta en rendimiento a las alteraciones en la disponibilidad de asimilados durante las diferentes fases fenológicas ha sido un avance importante en la fisiología de los cultivos. De esta manera, los períodos críticos han sido razonablemente bien establecidos para la mayoría de los principales cultivos (Borrás et al., 2004). En general, el rendimiento de los cultivos depende mayormente del número de granos, aunque el peso y tamaño de estos se relaciona con aspectos claves de la calidad industrial y de semilla, condicionando su uso final y la concentración de nutrientes a cosecha (Calderini et al., 2010; Lázaro et al., 2012). El efecto de los cambios en la relación fuente-destino (FD) sobre el peso del grano ha sido ampliamente estudiado en distintos cultivos, observando diferencias entre genotipos y especies (Borrás et al., 2004; Calderini et al., 2006; Gambin y Borrás, 2010; González et al., 2014; Serrago y Miralles,

2014). Sin embargo, el efecto de los cambios en la relación FD sobre la calidad del grano de trigo ha sido poco investigado, al igual que su interacción con la fertilización nitrógeno-azufrada. Esto contribuiría a diseñar estrategias de manejo que maximicen la productividad con calidad en un marco sustentable, basadas en la optimización de los planteos de fertilización.

En base a los antes expuesto, planteamos como objetivo de este trabajo analizar la incidencia de la fertilización NS en las respuestas del peso y la calidad del grano de trigo pan ante cambios en las condiciones de llenado asociadas con la disponibilidad de fotoasimilados. Nuestra hipótesis afirma que el peso del grano presenta mayor estabilidad que los parámetros de calidad ante cambios en la relación FD durante el llenado en condiciones de baja disponibilidad de N y S en prefloración, mientras que el peso del grano presenta menor estabilidad que los parámetros de calidad en condiciones de alta disponibilidad de nutrientes.

## Materiales y Métodos

Se realizaron cuatro experimentos a campo, dos en la campaña 2014/15 y otros dos en la campaña 2015/16. En el primer año se realizó un ensayo en la Chacra Experimental de la FAA-UNICEN (coordenadas: -36.83; -59.89) y otro ensayo en un lote de producción del establecimiento "La Cautiva" (LP14) ubicado sobre la Ruta N° 80 del partido de Azul (coordenadas: -36.98, -59.77). En el segundo año se realizó otro ensayo en la Chacra Experimental de la FAA-UNICEN y otro en un lote de producción ubicado en el Aeroclub de Azul (LP15) sobre la Ruta N° 3 (coordenadas: -36.98, -59.77).

### Chacra experimental

Los experimentos fueron conducidos durante las dos campañas en secano bajo el sistema de siembra directa. Se realizaron análisis de suelos sobre muestras compuestas obtenidas en pre-siembra; los cuales mostraron un pH moderadamente ácido a neutro, baja a moderada disponibilidad de fósforo (P), bajo contenido de materia orgánica, baja disponibilidad de N y moderada disponibilidad de S. Se utilizó el genotipo de ciclo corto Nidera Baguette 501 (2012-2015: grupo de calidad 2; 2016-2019: GC 3), sembrado el 07/08/2014 y 05/08/2015, con una densidad

de 350 plantas m<sup>-2</sup>. Se fertilizó para asegurar suficiencia de P con superfosfato triple a la siembra (38 kg P ha<sup>-1</sup>) y se controlaron adecuadamente malezas, plagas y enfermedades.

Los tratamientos de fertilización fueron: testigo sin fertilizar (NS0) y fertilizado al voleo con urea (180 kg N ha<sup>-1</sup>) en dosis dividida 40 % en emergencia y 60 % en macollaje y con sulfato de calcio (15 kg S ha<sup>-1</sup>) en macollaje (NS1).

Los tratamientos de relación FD fueron: testigo (T), sombreo (S: redes de 75 %), raleo (R: surco por medio) y desespiguillado (D: corte de media espiga superior). El momento de modificación de la relación FD fue a los 7 días después de anthesis y esto se debe a que, en general, en ese estado queda definido el número de granos y el peso potencial de los mismos.

Se utilizaron registros ambientales durante el cultivo (temperatura y precipitaciones), provenientes del Boletín Agrometeorológico del Centro Regional de Agrometeorología, Estación Centro, FAA-UNICEN (<http://www1.faa.unicen.edu.ar/centro/centroreg.php>).

En madurez se cosecharon muestras de cada parcela testigo para determinar el rendimiento en grano, la biomasa aérea total, el índice de cosecha y el número de granos por m<sup>-2</sup>; y de cada subparcela (0.36-0.40 m<sup>2</sup>) para determinar el peso de mil granos (PMG), el peso hectolítrico (PH) y el porcentaje de proteína (%Pro, base 13.5% humedad, analizador NIT AgriCheck Bruins Instruments). Luego parte de la muestra fue molida y tamizada para realizar el micro test de sedimentación en dodecil sulfato de sodio (SDSS) (Dick y Quick, 1983), siendo un indicador predictivo de calidad en el cual la altura del sedimento obtenido correlaciona positivamente con la fuerza del gluten.

Se implementó un DBCA con parcelas divididas y 3 repeticiones, aleatorizando los dos tratamientos de fertilización en las parcelas principales (9-12 m x 1.4 m) y los cuatro tratamientos de relación FD en las subparcelas. Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), utilizando el paquete estadístico Infostat v.2017p (Di Rienzo et al., 2017). En particular, las asociaciones entre variables de calidad se estudiaron mediante análisis de regresión simple ( $\alpha=0.05$ ), ajustando modelos exponenciales de segundo orden. Posteriormente se obtuvieron los valores óptimos, igualando a cero la primera derivada de la función de ajuste.

## Lotes de producción

**LP14:** El suelo de este lote es un Argiudol típico con moderada disponibilidad de materia orgánica y de P. Con relación al manejo implementado habitualmente por el productor, el sistema de labranza es de siembra directa y el genotipo de trigo pan utilizado Buck SY 200 (ciclo intermedio, GC 2), en su fecha de siembra y densidad recomendadas para la región. Con respecto a la fertilización, se aplican  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de fosfato diamónico ( $20 \text{ kg P ha}^{-1}$ ) incorporado a la siembra y  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de urea ( $46 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) al voleo en postemergencia. Se realiza control químico de malezas y no se aplican fungicidas.

**LP15:** El suelo de este lote es un Argiudol típico con disponibilidad moderada de materia orgánica y moderada a baja de P. Con relación al manejo implementado habitualmente por el productor-contratista, el sistema de labranza es de siembra directa, en rotación soja de 1°/cereal invernal-soja de 2°. El genotipo de trigo pan utilizado es ACA 303 (ciclo largo a intermedio, GC3), el cual es elegido frecuentemente por su muy buena sanidad, en su fecha de siembra (01/07/2015) y densidad recomendadas para la región. Con respecto a la fertilización, se aplica el equivalente a  $16 \text{ kg P ha}^{-1}$  de fertilizante fosforado incorporado a la siembra y  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  de urea ( $50,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) al voleo en postemergencia. Se realiza control químico de malezas y normalmente no se aplican fungicidas ya que el genotipo utilizado presenta buen comportamiento sanitario.

En ambos lotes de producción se demarcó el ensayo con el cultivo implantado por el productor. Los cuatro tratamientos de fertilización consistieron en combinaciones contrastantes de dos niveles de nitrógeno (N0: manejo del productor,  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) y dos de azufre (S0: manejo del productor,  $15 \text{ kg S ha}^{-1}$ ), siendo urea y sulfato de calcio las fuentes utilizadas, respectivamente. En LP14, los mismos se aplicaron en fin de macollaje; mientras que en LP15, se aplicó la urea en dosis dividida 40 % en emergencia y 60 % en macollaje, el sulfato de calcio en macollaje y se agregaron  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de superfosfato triple en emergencia. Por su parte, los tratamientos de relación FD fueron: testigo (T), defoliado parcial (Df: remoción de hoja bandera) y raleo (R: surco por medio); aplicados a los 7 días después de anthesis.

Se implementó un DBCA con parcelas divididas y tres repeticiones. En las parcelas principales (LP14:  $6 \times 1.9 \text{ m}$ ; LP15:  $15 \times 1.4 \text{ m}$ ) se aleatoriza-

ron los tratamientos de fertilización N x S y en las subparcelas los tratamientos de relación FD. En madurez se cosecharon muestras de cada parcela testigo para determinar el rendimiento en grano y de cada subparcela para determinar el peso de mil granos (PMG). Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), utilizando el paquete estadístico Infostat v.2017p (Di Rienzo et al., 2017).

## Resultados y Discusión

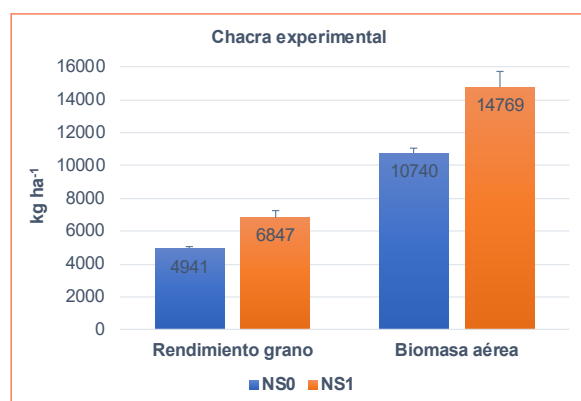
Los registros agrometeorológicos mostraron que las temperaturas medias en 2014 fueron superiores al promedio histórico durante todo el ciclo del cultivo, debido mayormente a un incremento en las temperaturas mínimas. A su vez, las temperaturas medias en 2015 fueron similares al 2014, excepto durante los meses de septiembre y octubre donde se observó una disminución por debajo del promedio histórico debido a cambios en las temperaturas mínimas y máximas. Por otro lado, las precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo en 2014 fueron levemente superiores al promedio histórico ( $390 \text{ vs. } 378 \text{ mm}$ ), debido a un incremento en las precipitaciones de agosto, septiembre y noviembre. Por su parte, las precipitaciones acumuladas en 2015 fueron levemente inferiores al promedio histórico ( $344 \text{ vs. } 378 \text{ mm}$ ), aunque las precipitaciones de agosto superaron en un 256% al histórico.

En los experimentos llevados a cabo en la chacra experimental (manejo de alta tecnología), la fertilización NS incrementó el rendimiento un 39% en promedio (**Figura 1**), asociado a un aumento del 44% en el número de granos ( $12\,446 \text{ vs. } 17\,933 \text{ granos m}^{-2}$ ) y del 38% en la biomasa aérea (**Figura 1**) de los tratamientos testigo (sin modificación de FD), independientemente del ambiente asociado al año; mientras que sólo incrementó el índice de cosecha en 2015 ( $2014\text{-}NS0=0.47 \text{ ab}$ ;  $2014\text{-}NS1=0.45 \text{ b}$ ;  $2015\text{-}NS0=0.45 \text{ b}$ ;  $2015\text{-}NS1=0.48 \text{ a}$ ), donde se registraron menores precipitaciones durante la fase de llenado. Con respecto a los rendimientos alcanzados, estos fueron superiores al promedio de las campañas 2014/15 y 2015/16 para el partido de Azul, tanto en condiciones de baja disponibilidad de N y S ( $NS0$ : +127%;  $4941 \text{ vs. } 3888 \text{ kg ha}^{-1}$ ) como de suficiencia de dichos nutrientes ( $NS1$ : 176%;  $6847 \text{ vs. } 3888 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Esto demuestra el efecto de la intensificación del planteo productivo en la chacra experimental.

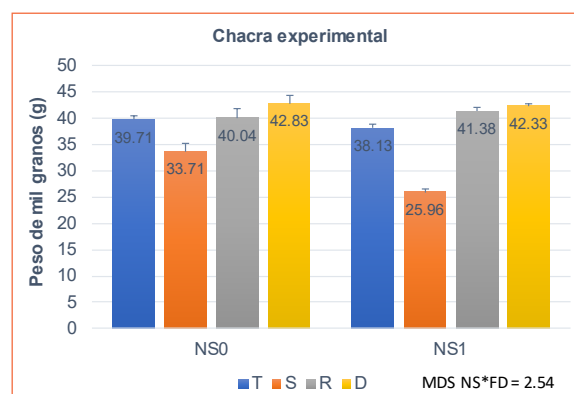


La relación FD fue la principal determinante del PMG, aunque este efecto dependió del año y del nivel de nutrientes (Tabla 1). De esta manera, las restricciones hídricas previamente descritas en 2015 incrementaron el grado de limitación por fuente, lo cual se evidencia en la respuesta negativa del PMG a la fertilización NS y en las respuestas significativas de este componente del rendimiento al incremento de FD por raleo y desespiguillado. Sin embargo, la merma de PMG debida a la reducción de FD por sombreado fue de mayor magnitud en 2014, en el cual las condiciones postfloración fueron más favorables. Por su parte, la fertilización combinada potenció el efecto de los cambios en la relación FD sobre el PMG, lo cual demuestra un incremento en la

fuerza de los destinos, comprometiendo así la capacidad de la fuente durante el llenado de granos (Figura 2). En este sentido, Madani et al. (2010) reportaron que el rendimiento de trigo se encuentra limitado en mayor medida por destinos más que por fuente bajo condiciones de deficiencia tanto de N como de agua, particularmente en postfloración, lo cual puede ser explicado por el hecho de que el aumento en el número de granos se atribuye a una mayor supervivencia de primordios florales (Araus et al., 2007). Sin embargo, Madani et al. (2010) observaron que un aumento en el suministro de N después de antesis no afectó la removilización de reservas desde los tallos o espigas a los granos, lo cual sugiere un incremento de la fotosíntesis



**Figura 1.** Medias de rendimiento en grano y de biomasa aérea para los tratamientos sin (NS0) y con (NS1) fertilización nitrógeno-azufrada en la chacra experimental (CH). Las barras indican el error estándar.



**Figura 2.** Medias de peso de mil granos (PMG) para los tratamientos testigo (T), sombreado (S), raleo (R) y desespiguillado (D); sin (NS0) y con (NS1) fertilización nitrógeno-azufrada en la chacra experimental (CH). Las barras indican el error estándar. Se indica la mínima diferencia significativa entre medias (MDS) para la interacción NS\*FD.

**Tabla 1.** Resumen de ANOVA incluyendo nivel de significancia (valor-p) y porcentaje de variabilidad explicada (%SC) de las fuentes de variación (F.V.) consideradas para peso de mil granos (PMG), porcentaje de proteína (%Pro), test de sedimentación (SDSS) y peso hectolítrico (PH) de los experimentos NS x FD en la chacra experimental.

F.V.	PMG		%Pro		SDSS		PH	
	valor-p	%SC	valor-p	%SC	valor-p	%SC	valor-p	%SC
A	<0.0001	5.7	0.0997	0.4	<0.0001	3.6	<0.0001	19.7
NS	0.0012	3.4	0.0014	69.3	0.0007	50.8	0.215	0.7
FD	<0.0001	71.8	<0.0001	25.9	<0.0001	13.3	<0.0001	50.8
A*NS	<0.0001	6.9	0.0141	0.9	<0.0001	12.0	0.6721	0.0
A*FD	0.0009	2.5	0.9282	0.1	0.0003	3.4	0.0006	4.1
NS*FD	<0.0001	8.7	0.0065	2.0	<0.0001	11.2	<0.0001	19.2
A*NS*FD	0.939	0.0	0.0427	1.2	<0.0001	5.5	0.0719	1.4

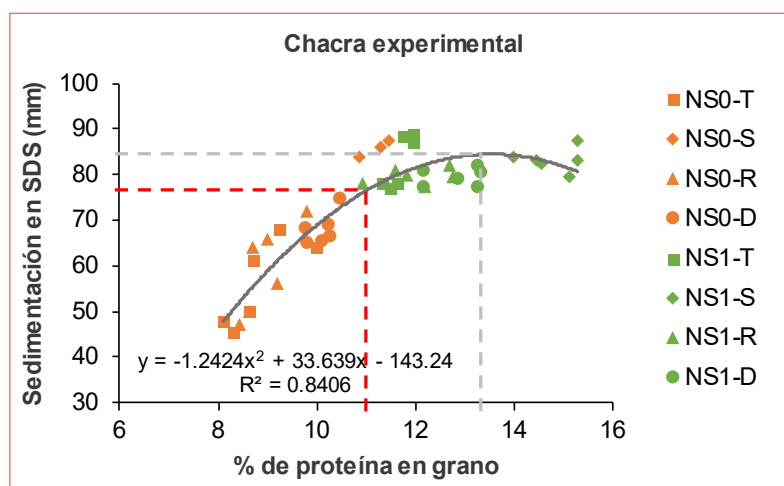
\*A: año, NS: fertilización nitrógeno-azufrada, FD: fuente-destino.

actual durante el llenado. Por su parte, Serrago et al. (2013) reportaron que el peso promedio de los granos aumentó significativamente en trigo y prácticamente no fue afectado en cebada al incrementar la relación FD mediante el recorte de la mitad superior de las espigas a los 7 días desde antesis, observando que los aumentos en el peso de los granos de trigo tendieron a ser mayores en condiciones de bajos insumos (sin riego ni fertilización con N) con respecto a una mayor intensificación.

Con respecto a la calidad del grano, la fertilización combinada potenció el incremento del %Pro cuando la disponibilidad de asimilados en postfloración se redujo por sombreado en ambos años, lo cual indicaría que bajo condiciones de elevada disponibilidad de nutrientes se incrementa el desbalance entre los niveles de precursores para la síntesis proteica y de precursores carbonados en favor de los primeros, comparando con condiciones de baja disponibilidad de N y S. El aumento en la disponibilidad de asimilados por desespiguillado incrementó el %Pro en ambos años cuando la disponibilidad de N y S fue baja, mientras que cuando se fertilizó sólo incrementó dicho parámetro en 2014, lo cual pudo estar relacionado con la menor disponibilidad hídrica durante el llenado en 2015. Por lo tanto, la fertilización NS contribuiría a mejorar la calidad del grano en la medida en que las

combinaciones de tecnología de producción y ambiente generen un incremento del grado de limitación por fuente durante el llenado (Tabla 1, Figura 3). Similarmente, Bancal (2009) reportaron que la fertilización nitrogenada temprana modificó el efecto del desespiguillado (-50 %) sobre el contenido de N en grano. Además, Passarella et al. (2008) encontraron que la fertilización nitrogenada en estado de bota modificó el grado de incremento del %Pro al recortar las espigas en cebada, dependiendo de la temperatura durante el llenado. Además de los efectos positivos de la fertilización con N y S sobre la fuerza del gluten, previamente reportados para trigo pan y candeal (Arata, 2017; Ercoli et al., 2011; Flaete et al., 2005; Luo et al., 2000), esta práctica de manejo mantuvo estable el SDSS al variar la disponibilidad de asimilados en postfloración. Por su parte, cuando la disponibilidad de nutrientes fue baja y dependiendo del año, las variaciones en la relación FD por sombreado y desespiguillado incrementaron el SDSS en consonancia con las respuestas del %Pro (Tabla 1, Figura 3).

El incremento en el porcentaje de proteína debido a variaciones en la disponibilidad de asimilados y a la fertilización combinada en ambos años se asoció en forma curvilínea con una mejora en la fuerza del gluten (SDSS); aunque se encontró un umbral de 13.54% que maximizó la calidad del gluten. Por lo tanto, en las condiciones evaluadas, aumentos en la síntesis proteica por encima de estos valores no generarían una mejora concomitante en la calidad panadera, independientemente de su bonificación por calidad comercial (Figura 3).

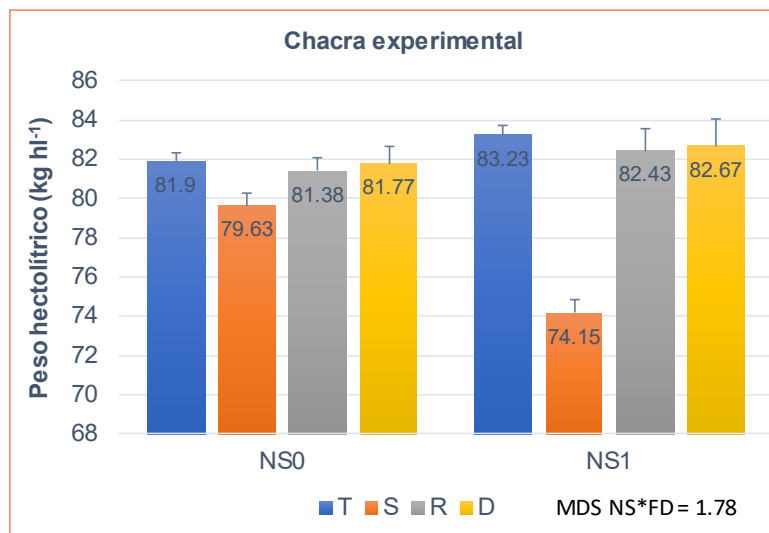


**Figura 3.** Relación entre el test de sedimentación (SDSS) y el porcentaje de proteína en grano (%Pro) para los tratamientos testigo (T), sombreado (S), raleo (R) y desespiguillado (D); sin (NS0) y con (NS1) fertilización nitrógeno-azufrada, de los dos años en la chacra experimental. Se indica con línea punteada gris el valor óptimo y con rojo el valor base según la norma de comercialización (Norma XX, 2004) de %Pro.

Mientras que la fertilización combinada resultó el principal factor determinante del %Pro y el SDSS, la relación FD lo fue para el peso hectolítrico (Tabla 1). Esto se debe al impacto de la disponibilidad de asimilados en postfloración sobre el tamaño, la forma y la rugosidad del grano; lo cual determina el peso por unidad de volumen. Sin embargo, la fertilización con N y S potenció significativamente la reducción del PH debida a una disminución de la FD por sombreo (Figura

4). En este sentido, un grano arrugado, con una marcada invaginación y una elevada proporción pericarpio/endosperma resulta en un menor peso hectolítrico y en un bajo rendimiento molinero (León y Rosell, 2007). Cabe destacar que el PH promedio para el tratamiento de sombreo con baja disponibilidad de N y S se ubicó dentro de la tolerancia para Grado 1 (79,6 vs. 79 kg hl<sup>-1</sup>) del estándar de comercialización de trigo en Argentina (Norma XX, Res. 1262/2004 SENASA,

Argentina), mientras que, con alta disponibilidad de estos nutrientes la merma por sombreo ubicó la media en el Grado 2 e incluso por debajo del requisito mínimo para la bonificación por contenido de proteína (74,2 vs. 75 kg hl<sup>-1</sup>). De esta manera, al igual que para el PMG, el incremento en la fuerza de los destinos debido a la fertilización comprometió la capacidad de la fuente durante el llenado, por lo que los incrementos de %Pro debidos a la reducción de FD no se traducen en una bonificación al precio desde el punto de vista de la calidad comercial.



**Figura 4.** Medias de peso hectolítrico (PH) para los tratamientos testigo (T), sombreo (S), raleo (R) y desespiguillado (D); sin (NS0) y con (NS1) fertilización nitrógeno-azufrada en la chacra experimental (CH). Las barras indican el error estándar. Se indica la mínima diferencia significativa entre medias (MDS) para la interacción NS\*FD.

**Tabla 2.** Resumen de ANOVA incluyendo nivel de significancia (valor-p) y porcentaje de variabilidad explicada (%SC) de las fuentes de variación (FV) consideradas para el peso de mil granos (PMG) de los experimentos N x S x FD en los lotes de producción (LP14: La Cautiva 2014, LP15: Aeroclub 2015).

F.V.	PMG			
	LP14		LP15	
	p-valor	%SC	p-valor	%SC
N	0.5397	0.6	0.0017	9.4
S	0.0308	25.3	0.8889	0.0
FD	<0.0001	42.4	<0.0001	68.5
N*S	0.0006	11.1	0.4027	0.9
N*FD	0.032	5.4	0.0153	13.0
S*FD	0.0417	4.9	0.8615	0.4
N*S*FD	0.3221	1.6	0.3394	2.8

\*N: fertilización nitrogenada, S: fertilización azufrada, FD: fuente-destino.

En los experimentos llevados a cabo en lotes de producción del partido de Azul (manejo de baja-media tecnología), la fertilización nitrogenada y azufrada generó efectos de menor magnitud y/o significancia que en la Chacra Experimental (manejo de alta tecnología). Por su parte, el rendimiento promedio en el lote de producción "La Cautiva" durante la campaña 2014/15 (LP14) fue un 29 % inferior al promedio del partido de Azul (2610 vs. 3681 kg ha<sup>-1</sup>), mientras que en el lote del "Aeroclub Azul" durante la campaña 2015/16 (LP15) fue 48 % superior al promedio del partido (6061 vs. 4094 kg ha<sup>-1</sup>). El bajo nivel de rendimiento alcanzado en LP14 se debió principalmente a un severo ataque tardío de roya negra o del tallo del trigo (*Puccinia graminis* f. sp. *tritici*), que generó una notable merma del PMG, considerando

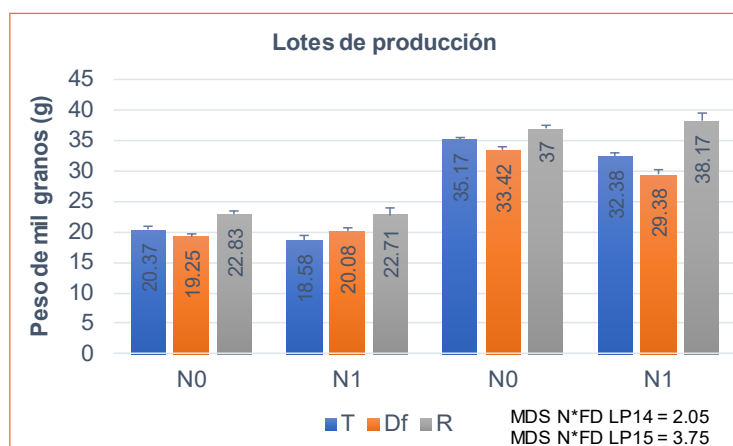
que el promedio de los tratamientos testigo (sin modificación de FD) en este ensayo fue un 48% menor que el promedio de todos los genotipos de trigo pan en la Chacra Experimental durante el mismo año (19.48 vs. 37.67 g).

En este contexto productivo, la relación FD y la disponibilidad de S fueron los principales factores determinantes del PMG, aunque las interacciones dobles fueron significativas (Tabla 2). Por un lado, la fertilización azufrada con alta disponibilidad de N generó una merma del 17 % en el PMG (N0S0=21.2 g ab; N0S1=20.4 g b; N1S0=22.4 g a; N1S1=18.5 g c), lo cual también fue reflejado en el rendimiento de las parcelas principales. Es ampliamente conocido que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en altas dosis tiende a aumentar la susceptibilidad de los cereales a enfermedades fúngicas, en especial las provocadas por patógenos biotróficos como la roya del tallo (Király, 1964; Précigout et al., 2017). Por su parte, la fertilización con S interacciona con la disponibilidad de N, mejorando la respuesta del rendimiento en grano, a través de un incremento en el índice de área foliar que permite una mayor intercepción de radiación por parte del cultivo (Arata et al., 2017; Salvagiotti y Miralles, 2008) (Arata et al., 2017; Salvagiotti y Miralles, 2008). Por lo tanto, los resultados observados para el PMG en LP14 podrían estar relacionados con un efecto de potenciación de la fertilización azufrada sobre el desarrollo de la roya del tallo.

Con respecto a la interacción entre la fertilización y la relación FD en LP14 (Tabla 2), el agregado de S redujo el incremento del PMG ante un incremento en la disponibilidad de asimilados por raleo; lo cual podría estar relacionado con lo antes discutido sobre el efecto de la fertilización que potencia la severidad de la roya del tallo, reduciendo así la expresión del peso del grano ante una mejora en las condiciones de llenado. Por el contrario, la fertilización nitrogenada favoreció la mejora del PMG al aumentar la relación FD, mientras que la reducción de la disponibilidad de asimilados por defoliado no afectó significativamente dicho componente del rendimiento (Figura 4).

El nivel de rendimiento alcanzado en LP15 con respecto al promedio del partido y a LP14 evidencia un ambiente de mayor calidad y productividad. Al comparar el manejo del cultivo implementado en cada lote de producción, surge como principal diferencia el manejo de enfermedades relacionado con el hospedante en LP15, considerando la elección de un genotipo con buen perfil sanitario.

La disponibilidad de asimilados durante el llenado de granos fue el principal factor determinante del PMG en el contexto productivo de LP15 (Tabla 2), el cual resultó similar al ambiente de la Chacra experimental en cuanto al nivel de productividad alcanzado. Sin embargo, la fertilización nitrogenada potenció el efecto de los cambios en la relación FD, potenciando el grado de limitación por fuente (Figura 4). En este



**Figura 5.** Medias del peso de mil granos (PMG) para los tratamientos testigo (T), defoliado (Df) y raleo (R); sin (N0) y con (N1) fertilización nitrogenada de los experimentos N x S x FD en los lotes de producción (LP14: La Cautiva 2014, LP15: Aeroclub 2015). Las barras indican el error estándar. Se indica la mínima diferencia significativa entre medias (MDS) para la interacción N\*FD dentro de cada experimento.



sentido, recientemente, Hisse et al. (2019) reconocen dos escenarios para el maíz en los cuales la respuesta del peso de grano a las variaciones en la relación FD depende de la disponibilidad de N. El primero constituye los sistemas de producción de alta disponibilidad de N, donde el PMG alcanzado está regulado por las condiciones de crecimiento durante el período crítico para la definición del número de granos, donde se define el peso potencial; así como durante el período de llenado efectivo del grano, donde se define el grado de "cumplimiento" de ese potencial. El segundo escenario es para condiciones de bajo nivel de N, en los cuales el PMG no alcanza el peso potencial, generando un desacople entre las relaciones FD durante el período crítico y el llenado efectivo.

## Conclusiones

Los resultados encontrados permiten corroborar parcialmente la hipótesis planteada, concluyendo que: i) la fertilización con nitrógeno/azufre potencia el efecto de los cambios en la relación fuente-destino sobre el peso de mil granos, dependiendo del nivel de tecnología del manejo implementado; ii) la fertilización NS potencia el efecto de la relación fuente-destino en postfloración sobre el % de proteína y el peso hectolítrico, mientras que estabiliza la fuerza del gluten (SDSS), cuando se implementa un manejo de alta tecnología (chacra experimental); iii) el incremento en el % de proteína debido a efectos de NS y FD se asocia en forma curvilínea con la fuerza del gluten (SDSS), por lo que se encuentra un valor óptimo que maximiza su calidad.

## Bibliografía

- Arata A.F.** 2017. Influencia de la fertilización con nitrógeno y azufre sobre la composición del gluten y la calidad industrial en genotipos argentinos de trigo pan (*Triticum aestivum* L.). Tesis para optar al título de Magister de la UBA, Área Producción Vegetal, EPG - FAUBA, Buenos Aires, Argentina, 140 p.
- Arata A.F., S.E. Lerner, G.E. Tranquilli, A.C. Arrigoni, y D.P. Rondanini D.P.** 2017. Nitrogen x sulfur interaction on fertiliser-use efficiency in bread wheat genotypes from the Argentine Pampas. *Crop and Pasture Science*, 68 (3):202-212.
- Araus J., J. Ferrio, R. Buxo, y J. Voltas.** 2007. The historical perspective of dryland agriculture: lessons learned from 10 000 years of wheat cultivation. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2):131-145.
- Bancal P.** 2009. Decorrelating source and sink determinism of nitrogen remobilization during grain filling in wheat. *Annals of Botany*, 103 (8):1315-1324.
- Borrás L., G.A. Slafer, y M.E. Otegui.** 2004. Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86 (2-3):131-146.
- Calderini D.F., C. Lizana, y R. Riegel.** 2010. Determinación del peso potencial de los granos de trigo y su comparación con otros cultivos. En: Miralles D.J., L.N. Aguirrezábal, M.E. Otegui, B.C. Kruk, y N. Izquierdo. *Avances En Ecofisiología de Cultivos de Granos*. Editorial FAUBA, 61-89.
- Calderini D.F., M.P. Reynolds, y G.A. Slafer.** 2006. Source-sink effects on grain weight of bread wheat, durum wheat, and triticale at different locations. *Crop and Pasture Science*, 57 (2):227-233.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, C.W. Robledo.** 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Dick J.W., y J.S. Quick.** 1983. A modified screening test for rapid estimation of gluten strength in early-generation durum wheat breeding lines. *Cereal Chemistry*, 60 (4):315-318.
- Dreccer M.F., R.A. Ruiz, G.A. Maddonni, y E.H. Satorre.** 2003. Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. En: Satorre E.H. *Producción de Granos. Bases Funcionales Para Su Manejo*. Editorial FAUBA, 481-497.
- Ercoli L., L. Lulli, I. Arduini, M. Mariotti, y A. Maso-**

- ni. 2011. Durum wheat grain yield and quality as affected by S rate under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 35 (2):63-70.
- Flaete N.E.S., K. Hollung, L. Ruud, T. Sogn, E.M. Faergestad, H.J. Skarpeid, E.M. Magnus, y A.K. Uhlen. 2005. Combined nitrogen and sulphur fertilisation and its effect on wheat quality and protein composition measured by SE-FPLC and proteomics. *Journal of Cereal Science*, 41 (3):357-369.
- Gambin B.L., y L. Borrás. 2010. Resource distribution and the trade-off between seed number and seed weight: a comparison across crop species. *Annals of Applied Biology*, 156 (1):91-102.
- González F.G., M.L. Aldabe, I.I. Terrile, y D.P. Rondanini. 2014. Grain Weight Response to Different Postflowering Source:Sink Ratios in Modern High-Yielding Argentinean Wheats Differing in Spike Fruiting Efficiency. *Crop Science*, 54 (1):297-309.
- Hisse I.R., K.E. D'Andrea, y M.E. Otegui. 2019. Source-sink relations and kernel weight in maize inbred lines and hybrids: Responses to contrasting nitrogen supply levels. *Field Crops Research*, 230:151-159.
- Ho L.C. 1988. Metabolism and Compartmentation of Imported Sugars in Sink Organs in Relation to Sink Strength. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 39:355-378.
- Király Z. 1964. Effect of Nitrogen Fertilization on Phenol Metabolism and Stem Rust Susceptibility of Wheat. *Journal of Phytopathology*, 51 (3):252-261.
- Lázaro L., P.E. Abbate, y V.T. Manfreda. 2012. Incidencia de las diferencias entre cultivares de trigo en la cantidad de fósforo exportada en los granos. *Agriscientia*, 29:1-13.
- León A.E., y C.M. Rosell. 2007. De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica. Hugo Báez Editor, 480 p.
- Luo C., G. Branlard, W. Griffin, y D. McNeil. 2000. The Effect of Nitrogen and Sulphur Fertilisation and their Interaction with Genotype on Wheat Glutenins and Quality Parameters. *Journal of Cereal Science*, 31 (2):185-194.
- Madani A., A.S. Rad, A. Pazoki, G. Nourmohammadi, y R. Zarghami. 2010. Wheat (*Triticum aestivum* L.) grain filling and dry matter partitioning responses to source:sink modifications under postanthesis water and nitrogen deficiency. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 32 (1):145-151.
- Miralles D.J., L.N. Aguirrezábal, M.E. Otegui, B.C. Kruk, y N. Izquierdo. 2010. Avances en ecofisiología de cultivos de granos. Editorial FAUBA, 306 p.
- Passarella V.S., R. Savin, y G.A. Slafer. 2008. Are temperature effects on weight and quality of barley grains modified by resource availability? *Australian Journal of Agricultural Research*, 59 (6):510-516.
- Peña R.J., R. Trethowan, W.H. Pfeiffer, y M.V. Ginkel. 2002. Quality (End-Use) Improvement in Wheat: Compositional, Genetic, and Environmental Factors. *Journal of Crop Production*, 5 (1-2):1-37.
- Précigout P.A., D. Claessen, y C. Robert. 2017. Crop Fertilization Impacts Epidemics and Optimal Latent Period of Biotrophic Fungal Pathogens. *Phytopathology*, 107 (10):1256-1267.
- Rondanini D.P., L. Borrás, y R. Savin. 2012. Grain Quality in Oil and Cereal Crops. En: Meyers R.A. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, 4550-4563.
- Salvagiotti F., y D.J. Miralles. 2008. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *European Journal of Agronomy*, 28 (3):282-290.
- Serrago R.A., I. Alzueta, R. Savin, y G.A. Slafer. 2013. Understanding grain yield responses to source-sink ratios during grain filling in wheat and barley under contrasting environments. *Field Crops Research*, 150:42-51.
- Serrago R.A., y D.J. Miralles. 2014. Source limitations due to leaf rust (caused by *Puccinia triticina*) during grain filling in wheat. *Crop and Pasture Science*, 65 (2):185-193.
- Shewry P.R. 2009. Wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60 (6):1537-1553.
- Sonnevald U., y A.R. Fernie. 2018. Next-generation strategies for understanding and influencing source-sink relations in crop plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 43:63-70. ◀

# Validación a campo de los modelos de nutrición nitrogenada para trigo y cebada

Divito, G.A.<sup>1</sup>; Sainz Rozas H.R.<sup>2</sup>; Torres, A.<sup>1</sup>; Berg, G.<sup>3</sup>; Piloni, L.<sup>4</sup>; Kitroser J.<sup>5</sup> Therisod G.<sup>5</sup>

AAPRESID, <sup>1</sup>Regional Necochea, <sup>3</sup>Juan Manuel Fangio, <sup>4</sup>Tres Arroyos y <sup>5</sup>Tandilia.

<sup>2</sup>Unidad Integrada Balcarce INTA-Facultad de Ciencias Agrarias UNMdP  
guillermodivito@gmail.com

La nutrición de trigo y cebada es fundamental para el logro de elevados rendimientos y la obtención de granos de buena calidad según el destino comercial. El presente trabajo tiene como objetivo describir las metodologías de diagnóstico y fertilización nitrogenada más empleadas y mostrar los resultados que se observan en lotes de producción de las Regionales AAPRESID del sudeste bonaerense.

La información de campo surge de 311 lotes de cebada (199 de la Regional Necochea, 63 de J.M. Fangio, 20 de Tres Arroyos y 29 de Azul-Tandil) y 448 lotes de trigo (89 de Necochea, 277 de J.M. Fangio, 49 de Tres Arroyos y 33 de Azul-Tandil) de las campañas 2015/16, 2016/17 y 2017/18. Los mismos provienen de zonas representativas de las cuatro Regionales: desde Gral. Madariaga (al este) hacia Azul (al oeste) y hasta Tres Arroyos (hacia el sur). Puede consultarse más información en Therisod et al. (2017) y Divito et al. (2018).

## El ambiente

Las condiciones ambientales del sudeste bonaerense son muy favorables para el crecimiento y desarrollo de los cereales de invierno (Abbate, 2017). En general, existe baja probabilidad de ocurrencia de déficit hídrico previo al período crítico para la definición del rendimiento, que ocurre entre mediados de octubre y mitad de noviembre. Por el contrario, son frecuentes los excesos de agua entre la siembra y comienzos de encañazón, que reducen la eficiencia de uso del nitrógeno (N) aplicado en estadios tempranos (Reussi Calvo y Echeverría, 2006). Por otra parte, los registros moderados de temperatura alrededor de floración definen valores de cociente fototermal (relación entre la radiación solar media y la temperatura media) muy favorables para el cultivo (Abbate, 2017).

En este contexto, es fundamental definir estrategias de fertilización nitrogenada adecuadas, a fin de lograr altos rendimientos, obtener granos con elevado contenido de proteína y procurar la mayor eficiencia en el uso del nutriente.

## Métodos de diagnóstico

### Modelos empíricos "tradicionales"

Los "modelos empíricos" son la metodología más usual para definir la fertilización de los cultivos en la zona y en la Región Pampeana en general. Los mismos se basan en el análisis de información experimental sobre la respuesta del rendimiento de los cultivos ante un gradiente de disponibilidad de N en el suelo en forma de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) sumado al N aportado por el fertilizante (Figura 1). Estos modelos son popularmente conocidos como "tanto - X" (Ej. 120-X). Así, la recomendación de la cantidad de N a aplicar como fertilizante (**Nf**) se realiza según la diferencia entre el umbral crítico (**Uc**) y la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en el suelo ("**X**"), generalmente medida en el estrato 0-60 cm de profundidad:  $\text{Nf} = \text{Uc} - \text{X}$ .

Para el sudeste bonaerense, esos modelos comúnmente oscilan alrededor de 120-X para la zona de Tres Arroyos, 150-X para la zona "continental" de Necochea y serrana somera y 200-X en ambientes de alto potencial de rendimiento (zona costera de Necochea hacia Gral. Madariaga). De manera general, los distintos Uc que se establecen entre regiones obedecen a diferencias en: *rendimiento objetivo* (a mayor rendimiento, aumentan los requerimientos de N), el *ambiente general* (las características del suelo y clima definen tanto la demanda de N del cultivo como la dinámica del nutriente en el suelo), *cultivares* (según potencial de rendimiento y eficiencia de uso de N) y el manejo agronómico del cultivo y fertilización (definen la eficiencia de uso del fertilizante).

Como se indicó, estos modelos son los más empleados, aunque presentan como desventajas que: i) no contemplan la oferta de N por mineralización durante el ciclo del cultivo, ii) no consideran el contenido de proteína en grano, ni iii) el diagnóstico en estadios avanzados del cultivo.

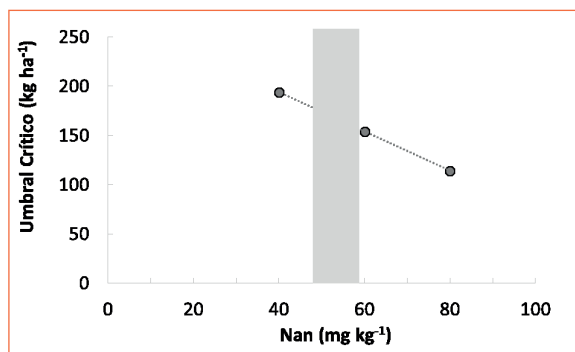
### Inclusión de estimadores del potencial de mineralización

La materia orgánica (MO) del suelo constituye una de las principales fuentes de N para los cultivos. Existe una amplia variación en el contenido de MO entre suelos de distintas zonas y, mismo, entre suelos de una misma región, lo que genera diferencias en el potencial de mineralización del nutriente. En los últimos años se ha avanzado en el estudio de estimadores sencillos de dicho potencial, siendo el **N anaeróbico (Nan)** uno de los métodos que mejor performance ha mostrado (Reussi Calvo et al., 2013). Así, su incorporación a los modelos empíricos tradicionales nos permite un mejor ajuste de la fertilización. A modo de ejemplo, la inclusión del Nan evitaría la subestimación de la dosis de N en situaciones de bajo potencial de mineralización (ej. lotes con prolongada historia agrícola) o la sobrestimación en ambientes de alto potencial (ej. lotes que han tenido pasturas recientemente).

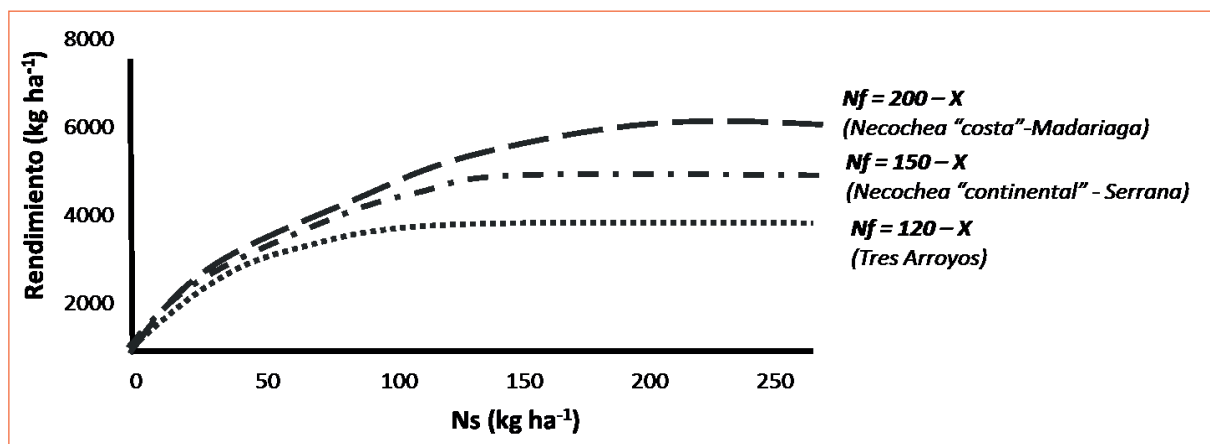
Trabajos recientes indican que por cada 1 mg kg<sup>-1</sup> que varía el Nan, el N proveniente de la mineralización absorbido por la planta se modifica 1,37 kg ha<sup>-1</sup> (Reussi Calvo et al., 2018) (Figura 2). Así, empleando este valor promedio, y considerando un 60-70% de eficiencia de uso del N mineralizado, surge que es necesario corregir en ≈2-2,3 kg ha<sup>-1</sup> los modelos empíricos tradicionales en la medida en que el Nan se aparta 1 mg kg<sup>-1</sup> de los valores medios de la zona (Figura 2). Estos modelos de recomendación solo deben considerarse como una primera aproximación y, por ende, es necesario el monitoreo dinámico del cultivo.

### Modelos que incorporan "proteína objetivo"

Los modelos empíricos tradicionales, o aun los que consideran el Nan, definen el **Uc** en el punto donde se maximiza el rendimiento (o se obtiene un alto porcentaje del máximo), pero no consideran el contenido de proteína en grano. En este sentido, Prystupa et al. (2018) propusieron un modelo superador para cebada que permite definir la oferta de N ( $N-NO_3^-$  en 0-60 cm + fertilizante) por tonelada de rendimiento objetivo según el contenido de proteína que se pretenda alcanzar. Para el sudeste bonaerense, trabajos en curso muestran que son necesarios alrededor de



**Figura 2.** Umbral crítico (kg N ha<sup>-1</sup>) para el modelo empírico en función del N incubado en anaerobiosis (Nan, mg kg<sup>-1</sup>) para el sudeste bonaerense. Umbral calculado para rendimiento de trigo de 5500 kg ha<sup>-1</sup> y asumiendo que el contenido de proteína se mantiene constante. Elaborado en base al modelo propuesto por Reussi Calvo et al. (2018). La franja gris indica valores medios de Nan para el sudeste bonaerense (Reussi Calvo et al., 2014).



**Figura 1.** Representación teórica del rendimiento del trigo o cebada en función de la disponibilidad de N ( $N-NO_3^-$  en 0-60 cm + N del fertilizante, kg ha<sup>-1</sup>) para distintas zonas del sudeste de Buenos Aires.



32 kg N tonelada de grano para lograr 10% de proteína (Queirolo l., com. pers.). Sin embargo, como se desprende de la sección anterior, este valor puede variar en función del potencial de mineralización del suelo, entre otros.

### Modelos dinámicos: uso de sensores ópticos en estadios avanzados

La aplicación de N “de base” generalmente se hace fraccionando la dosis, entre los estadios Z12 y Z31, a fin de lograr una mayor eficiencia de uso del nutriente (Velasco et al., 2012; Orcellet et al., 2015). En este punto, existe diferencia respecto a lo usual para el oeste de Buenos Aires o sur de Córdoba o Santa Fe, donde las precipitaciones son menos abundantes. La proporción del fertilizante a aplicar en cada oportunidad se decide según la disponibilidad de N determinada con el análisis del suelo. Así, si la disponibilidad es baja (50 kg N ha<sup>-1</sup>, o menos), se aplica un 60-70% de la dosis en la primera fertilización y un 30-40% en la segunda. Si la disponibilidad es mayor se fracciona la dosis en mitades. Asegurar una buena provisión de N durante el macollaje es particularmente importante en cebada, donde el número de macollos o espigas condicionan fuertemente el rendimiento debido a la menor plasticidad reproductiva en comparación con el trigo.

Una vez realizada la aplicación “de base” es necesario continuar con el monitoreo del status nitrogenado del cultivo. Para tal fin, existe una amplia gama de sensores de transmitancia y refractancia que permiten evaluaciones rápidas

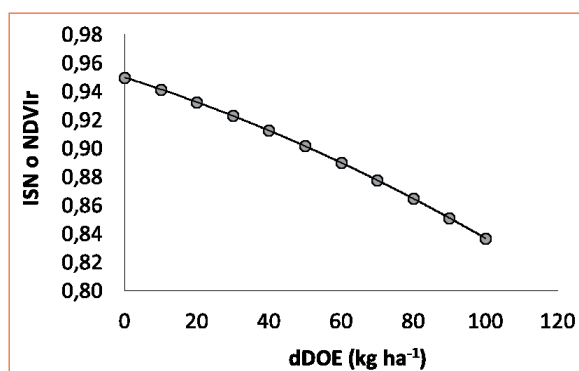
y no destructivas. Uno de los instrumentos más difundidos es el medidor de clorofila Minolta SPAD® 502, que determina la intensidad del color verde de la hoja (índice de verdor, IV). También existen sensores remotos capaces medir la reflectancia espectral del cultivo. Entre ellos, los más utilizados son los que permiten calcular el índice normalizado de diferencias de vegetación (NDVI, según sus siglas en inglés), que depende de la capacidad del cultivo de interceptar (de acuerdo al área foliar) y absorber (según la concentración de clorofila) la radiación. Tanto el IV como el NDVI están afectados por varios factores como la variedad y estado de desarrollo del cultivo, la incidencia de plagas, enfermedades etc. Por ello, es necesario establecer en el lote a monitorear áreas o “franjas” de referencia con suficiencia de N a fin de relativizar las mediciones según:

$$ISN = IV_{lote} / IV_{ref} \quad \text{ó}$$

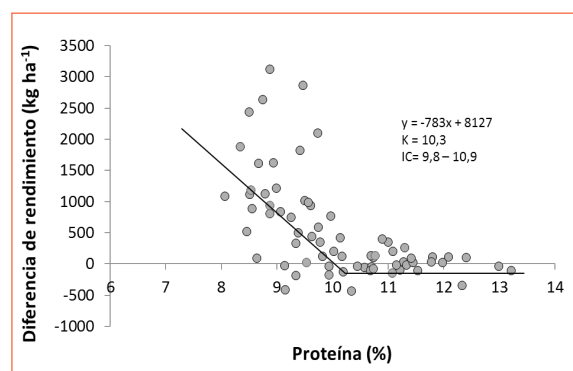
$$NDVlr = NDVI_{lote} / NDVI_{ref}$$

donde: ISN es el índice de suficiencia de N, NDVlr es el NDVI relativo,  $IV_{lote}$  y  $NDVI_{lote}$  son el IV y NDVI del lote problema, respectivamente e  $IV_{ref}$  y  $NDVI_{ref}$  representan el IV y NDVI de las franjas con suficiencia de N, respectivamente.

A partir de dichos indicadores Queirolo et al. (2018) propusieron modelos que permiten estimar la dosis de N a aplicar en cebada en el sudeste bonaerense. La Figura 3 muestra que en la medida que el ISN o el NDVlr del lote es menor, mayor será la cantidad de N a aplicar para alcanzar la



**Figura 3.** Índice de suficiencia de N (ISN) e índice normalizado de diferencias de vegetación relativizado (NDVlr) en función de la diferencia de N disponible con respecto a la dosis óptima económica (dDOE). Modelo propuesto por Queirolo et al. (2018) para evaluaciones entre los estadios Z31 y Z39 de cebada.



**Figura 4.** Diferencia en rendimiento entre tratamientos con dosis crecientes de nitrógeno y aquellos fertilizados con dosis de suficiencia (kg ha<sup>-1</sup>) en función de la concentración de proteína en grano. Datos de Reussi Calvo et al. (2013) y Divito y Torres (inédito). K es el valor de proteína umbral e IC es el intervalo de confianza del umbral.

dosis óptima económica (dDOE) para rendimiento. Similares relaciones han sido determinadas en trigo por Reussi Calvo et al. (2015) para la misma región. Es importante destacar que la fertilización con N en estadios avanzados del cultivo (Z31 a Z39) debe plantearse como complemento a las aplicaciones “de base” y con el fin de realizar ajustes menores en las dosis del nutriente.

### Diagnóstico final: proteína en grano

La concentración de un nutriente en grano es un indicador robusto de la disponibilidad del mismo que tuvo un cultivo (Salvagiotti et al., 2012; Divito et al., 2015). De este modo, el contenido de proteína en granos de trigo y cebada puede emplearse como indicador del grado de deficiencia de N. Del análisis de datos de ensayos realizados en trigo (Divito y Torres, inédito y Reussi Calvo et al., 2013) surge que cuando el contenido de proteína fue menor a 10,3%, los tratamientos manifestaron mermas en el rendimiento con respecto a aquellos que recibieron dosis de suficiencia del nutriente (Figura 4).

## Datos de campo: validación de modelos y desafíos

### Rendimiento

Los rendimientos medios de trigo y cebada fueron altos en las últimas tres campañas. El promedio para trigo de las Regionales JM Fangio, Necochea y Azul Tandil fue  $5070 \text{ kg ha}^{-1}$ , mientras que hacia Tres Arroyos los rendimientos medios fueron menores ( $3707 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 5). Para cebada las tendencias fueron similares, aunque se destaca el mayor rendimiento medio para todas las Regionales y campañas respecto al trigo ( $664 \text{ kg ha}^{-1}$ , en promedio). También se observó menor variabilidad en el rendimiento y menor diferencia entre Regionales respecto a trigo (Figura 5). Esto estaría explicado principalmente por las características del cultivo de: (i) menor susceptibilidad al estrés debido a deficiencias hídricas y (ii) mayor tolerancia a heladas (Frederiks, et al., 2015) (que provocó pérdidas de rendimiento en la zona en el ciclo 2016/17).

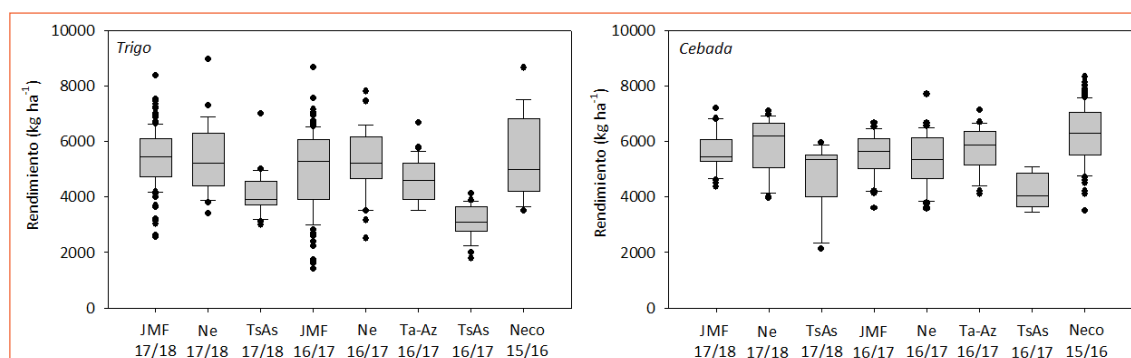


Figura 5. Rendimiento de trigo y cebada en lotes de las Regionales JM Fangio (JMF), Necochea (Ne), Tres Arroyos (TsAs) y Tandil-Azul (Ta-Az) para las campañas 17/18, 16/17 y 15/16.

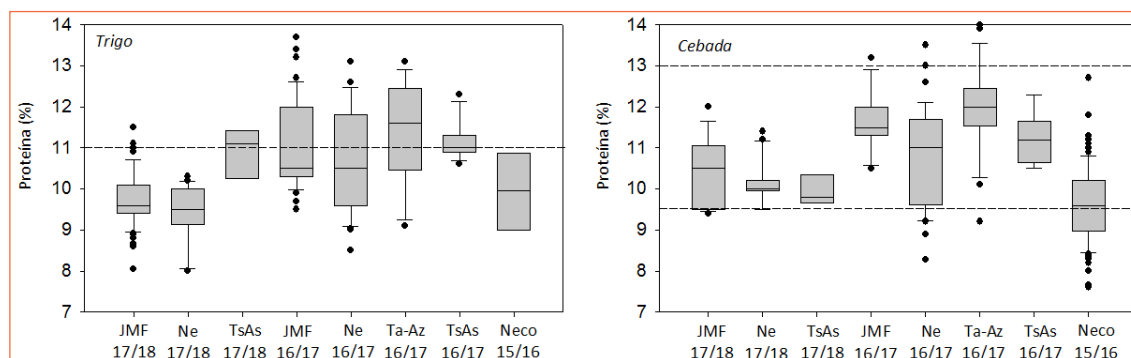


Figura 6. Proteína en grano de trigo y cebada en lotes de las Regionales JM Fangio (JMF), Necochea (Ne), Tres Arroyos (TsAs) y Tandil-Azul (Ta-Az) para las campañas 2017/18, 2016/17 y 2015/16. Líneas punteadas marcan el límite establecido para bonificaciones o rebajas en la Norma de Calidad para la Comercialización de Trigo Pan o el límite máximo y mínimo establecido en la Norma de Calidad para la Comercialización de Cebada.

Se destaca que en el 27% de los lotes de trigo y el 48% de los de cebada de las Regionales JM Fangio, Necochea y Tandil-Azul se lograron rendimientos superiores a los 6000 kg ha<sup>-1</sup>. Estos rendimientos imponen un desafío para el manejo de la nutrición, en especial si se pretende obtener granos con altos valores de proteína.

### Proteína

En trigo, y para la campaña 2017/18, el contenido de proteína promedio de Necochea y JM Fangio fue 9,7%, mientras que en Tres Arroyos fue 10,6%. En 2016/17, el valor medio fue 11,1%, siendo este levemente menor en Necochea. Por su parte, en 2015/16 la concentración promedio de Necochea fue 10,1% (Figura 6). En cebada la tendencia general fue similar, observándose mayores contenidos de proteína en la campaña 2016/17 para todas las Regionales (Figura 6).

En las Regionales J.M. Fangio y Necochea la concentración de proteína en granos de trigo en las campañas 2017/18 y 2015/16 fue, en casi la totalidad de los lotes, menor al límite inferior que marca la Norma de Comercialización para la aplicación de descuentos (11%). Estos resultados concuerdan con el manejo nutricional de los cultivos más frecuente en estas Regionales, donde el destino de la exportación no ofrece suficientes estímulos comerciales para el logro de elevados valores de proteína. Sin embargo, se destaca que, para las tres campañas analizadas, el 65% de los lotes de dichas Regionales presentaron valores de proteína menores a 10,3%, umbral por debajo del cual se observaron diferencias en el rendimiento con respecto a cultivos sin deficiencia de N (Figura 5). Esto indica que,

aunque el destino comercial no ofrezca ventajas que ameriten planteos intensivos en el uso de N, resulta importante realizar un correcto diagnóstico y fertilización porque la deficiencia puede restringir el rendimiento. Por otra parte, en Tres Arroyos y Azul-Tandil, los molinos harineros representan un destino importante de la producción, por lo que la elección de cultivares y estrategias de fertilización permiten obtener valores elevados de proteína (Figura 6).

En cebada se observó que el 89% de los lotes presentó valores de proteína dentro del rango establecido en la Norma de Calidad para la Comercialización de Cebada Cervecera. En este caso, el sobreprecio percibido por el productor respecto a la comercialización como forrajera (hasta U\$S 30 por tonelada), incentiva al uso de métodos de diagnóstico y buenas prácticas de fertilización.

Para ambos cultivos, se determinó asociación negativa entre rendimiento y proteína ( $P < 0,01$ ). Como se observa al contrastar las relaciones entre variables para los dos cultivos con las isolíneas de rendimiento de N (Figura 7), la caída en los valores de proteína fue mucho más atenuada que la dilución de N, lo que indica que la oferta de N aumentó conforme lo hizo el rendimiento del ambiente. Sin embargo, la asociación negativa confirma lo mencionado anteriormente: mantener altos valores de proteína constituye un desafío en ambientes de alto potencial de rendimiento.

### Modelos para "proteína objetivo"

Para lotes de cebada provenientes de las cuatro Regionales y tres ciclos de cultivo, existió asociación entre el contenido de proteína en

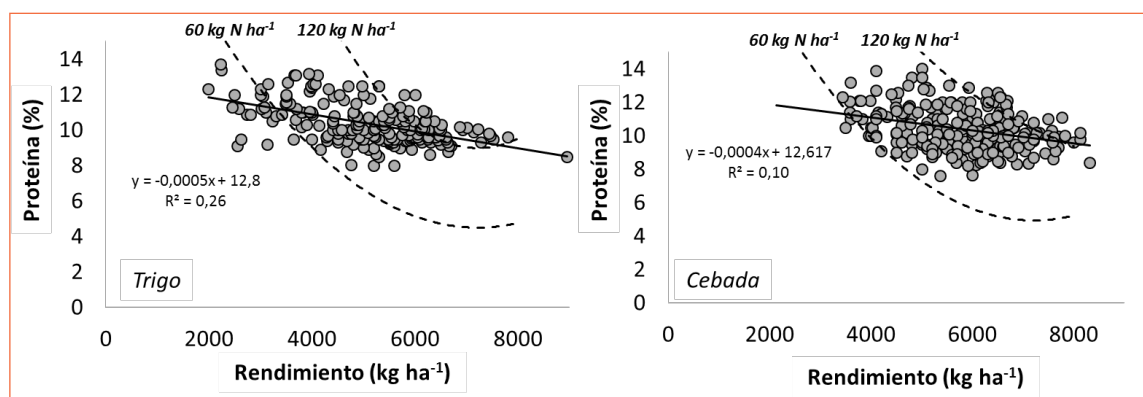
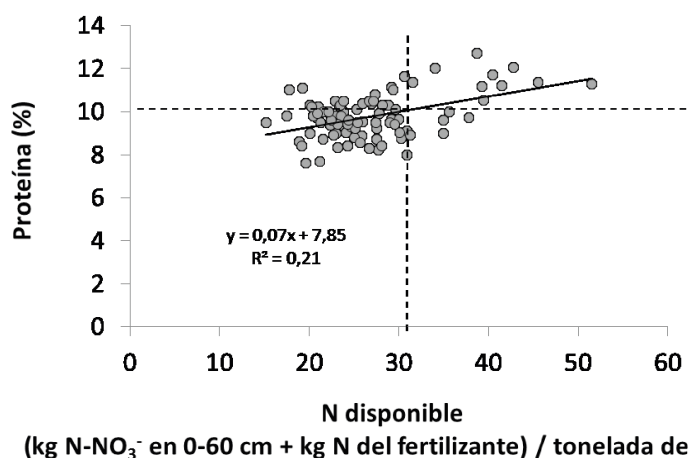


Figura 7. Relación entre proteína en grano y rendimiento para trigo y cebada. Las líneas punteadas conectan puntos con igual rendimiento de nitrógeno en grano (kg N ha<sup>-1</sup>).

grano y el cociente entre la oferta de N ( $\text{N-NO}_3^-$  en 0-60 cm + N del fertilizante) por tonelada de grano (Figura 8). El umbral establecido para obtener 10% de proteína fue 30,2 kg N tonelada<sup>-1</sup>, similar al obtenido por Queirolo (com. pers.) en ensayos realizados en la zona. No obstante, se observa una importante variación alrededor de la recta de ajuste. Entre otras causas, esto puede obedecer a variaciones en el potencial de mineralización de los lotes. En trigo, también puede haber diferencias entre variedades que pertenecen a distinto grupo de calidad. Fraschina (2017) determinó que variedades del Grupo 1 alcanzan un mayor contenido de proteína en grano ante igual disponibilidad de N por tonelada de grano. Se destaca que la validación con datos de campo de los modelos y umbrales surgidos en ámbitos académicos reafirma su utilidad.

Es importante destacar que para lograr que el cultivo tenga una determinada disponibilidad de N por tonelada de rendimiento, a fin de lograr el contenido de proteína propuesto, es necesario tener una proyección acertada de dicho rendimiento. Para ello, productores y asesores deben poner énfasis en definir la distribución de probabilidades de rendimiento de cada lote y/o ambiente dentro de un lote. En estos casos, el análisis de información de campañas previas y el uso de modelos de simulación resulta de utilidad. Como se indicó, es fundamental el empleo de modelos dinámicos de diagnóstico (con sensores ópticos, etc.) que permitan realizar correcciones según variaciones en el rendimiento proyectado.



**Figura 8.** Relación entre proteína en grano y el cociente entre la disponibilidad de N ( $\text{N-NO}_3^-$  en 0-60 cm + N del fertilizante) y el rendimiento en grano para cebada. Datos de lotes de producción.

## Consideraciones finales

Las condiciones ambientales del sudeste bonaerense permiten obtener rendimientos elevados en trigo y cebada. Por ello, la obtención de granos con alta proteína constituye un desafío.

Los modelos de diagnóstico que contemplan el potencial de mineralización de N del suelo, el contenido de proteína de los granos y que permiten el monitoreo en estadios avanzados del cultivo constituyen alternativas superadoras a los modelos empíricos tradicionales.

Los datos surgidos de lotes de producción validan los modelos surgidos en ámbitos académicos, lo que representa un estímulo para su empleo.

## Bibliografía

- Abbate, P.E.A.** 2017. Ecofisiología y manejo del cultivo de trigo. En: Divito G.A. y García F.O. Manual del cultivo de trigo. International Plant Nutrition Institute. Pp 33-52.
- Divito, G.A., Echeverría, H.E., Andrade, F.H., Sadras, V.O.** 2015. Diagnosis of S deficiency in soybean crops: performance of S and N:S determinations in leaf, shoot and seed. Field Crops Res. Field Crops Res. 180, 167-175.
- Divito, G.A.; Torres, A.; Bergh, G.; Piloni, L. Martínez.** 2017. Lo que la fina nos dejó. Red de Innovadores. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID). 162: 22-27.
- Fraschina J.** 2017. ¿Por qué es importante la calidad del trigo? En: Divito G.A. y García F.O.



- Manual del cultivo de trigo. International Plant Nutrition Institute. Pp 57-66.
- Frederiks, T. M., Christopher, J. T., Sutherland, M. W., & Borrell, A. K.** 2015. Post-head-emergence frost in wheat and barley: defining the problem, assessing the damage, and identifying resistance. *Journal of experimental botany*, 66(12), 3487-3498.
- Orcellet, JM.; NI Reussi Calvo; HE Echeverría; HR Sainz Rozas; N Diovisalvi & A Berardo.** 2015. Eficiencia de uso de nitrógeno en cebada en el sudeste bonaerense: efecto de aplicaciones divididas. *Ciencia Suelo* 33 (1): 97-105.
- Prystupa, P. Ferraris, G. Ventimiglia, L. Loewy, T. Couretot, L. Bergh, R. Gómez, F. Gutiérrez Boem, F.** 2018. Environmental control of malting barley response to nitrogen in the Pampas, Argentina. *Int. J. Plant Prod.* 12: 127.
- Queirolo, I.M., Reussi Calvo N., Sainz Rosas H.R., Prystupa P., Divito G.** 2018. Uso de sensores de canopeo para calcular la dosis óptima económica de nitrógeno en cebada. En: XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Tucumán. (on-line).
- Reussi Calvo, N. & H. Echeverría.** 2006. Estrategias de fertilización nitrogenada en trigo: balance hídrico para el sur bonaerense. *Cien. Suelo*. 24 (2):115-122.
- Reussi Calvo, N.I., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, A. Berardo.** 2013. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agron. J.* 105:321-328
- Reussi Calvo, N.; H. Sainz Rozas; H. Echeverría; N. Diovisalvi.** 2015. Using canopy indices to quantify the economic optimum nitrogen rate in spring wheat. *Agronomy Journal*, 107 (2): 459-465.
- Reussi Calvo, N.I., Wyngaard, N., Orcellet, J., Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H.E.** 2018. Predicting Field-Apparent Nitrogen Mineralization from Anaerobically Incubated Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 82(2), 502-508.
- Salvagiotti, F., Ferraris, G., Quiroga, A., Barraco, M., Vivas, H., Prystupa, P., Echeverría, H., Gutiérrez Boem, F.H.,** 2012. Identifying sulfur deficient fields by using sulfur content; N:S ratio and nutrient stoichiometric relationships in soybean seeds. *Field Crops Res.* 135, 107-115.
- Therisod G.; Bergh, G.; Divito, G.A.; Torres, A.; Piloni, L.** 2017. ¿Qué nos dejó la fina 2016/17 en el sudeste bonaerense? *Revista Técnica. Cultivos Invernales 2017. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID)*, 4-12.
- Velasco, JL; H Sainz Rozas; H Echeverría & P Barbieri.** 2012. Optimizing fertilizer nitrogen use efficiency by intensively managed spring wheat in humid regions: Effect of split application. *Can. J. Plant Sci.* 92:1-10 ◀



# Diagnóstico de condición nitrogenada y brecha de rendimiento por nitrógeno a tres nudos en trigo

C. N. Fassana<sup>1</sup>, E. M. Hoffman<sup>1</sup>, A. G. Berger<sup>2</sup>, y O. R. Ernst<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Producción Vegetal, Estación Experimental Mario A. Cassinoni. Ruta 3 km 363, 60000, Paysandú, Uruguay.

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. INIA La Estanzuela. Ruta 50, Km 11, 70000, Colonia, Uruguay.

cnfassana@gmail.com

## Introducción

En Uruguay, la recomendación de dosis de nitrógeno (N) en trigo implica cuantificar la disponibilidad de  $N-NO_3^-$  en suelo a siembra y Z.22 (dos macollos) y N total en planta (Nt) a Z.30 (encañado) (Hoffman et al., 2010). En los últimos 15 años, aumentó el N recomendado, consecuencia del incremento de la dosis en Z.30, generando pulsos de N que no son absorbidos de inmediato. Sin embargo, existe respuesta a dosis mayores a las recomendadas, evidenciando brecha de rendimiento por N (BR). Dos procesos la explican: i) menor aporte de N por el suelo (Hoffman et al., 2015, Morón y Quincke, 2010), generado por la desarticulación del sistema de rotación pasturas-cultivos (Wingeyer et al., 2015, Franzluebbers et al., 2014); y ii) aumento en la demanda por incremento del rendimiento potencial (Berger et al., 2018, Hoffman et al., 2018, Sadras et al., 2016).

Chen (2015) presenta una revisión de trabajos relacionados a la estimación del contenido de N y producción de biomasa aérea (MS) de cultivos mediante índices obtenidos con sensoramiento remoto, entre ellos NDVI (*Normal difference vegetation index*). Sin embargo, son escasos los trabajos (Chen, 2015; Cilia et al., 2014; Fitzgerald et al., 2010; Mistele y Schmidhalter, 2008; Rodríguez et al., 2006; Lukina et al., 2001) que consideran el efecto dilución de N (Justes et al., 1994), para realizar diagnósticos de condición nitrogenada en base a un nivel de referencia. Estos antecedentes llevan a considerar el NDVI (índice relacionado al contenido de N y MS) como posible estimador del INN (índice que contempla el efecto dilución de N), y por tanto, sustituir el muestreo físico de los componentes del INN (MS y concentración de N).

Se propone mejorar la sincronía entre oferta y demanda, definiendo la cantidad de N a agregar en base al estado nutricional del cultivo en

Z.33 (tres nudos). Los objetivos fueron: i) ajustar la curva de dilución de N (CDN) bajo condiciones de agua limitante; ii) estimar la BR en Z.33; iii) generar y validar el nivel crítico del índice de nutrición nitrogenada (INN) como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33; iv) cuantificar la existencia de respuesta al N en Z.33; v) evaluar la capacidad del NDVI como estimador del INN; y vi) cuantificar la respuesta en rendimiento a N agregado en Z.33 en referencia al rendimiento obtenido siguiendo el modelo actual de recomendación.

## Materiales y métodos

Se dispuso de una base de datos compuesta por 28 experimentos de respuesta al N, con muestreos de materia seca y Nt en Z.22, Z.30, Z.33 y Z.65 (antesis), desarrollados entre 2011-2016 en el litoral agrícola uruguayo. La curva de dilución de nitrógeno (CDN) se determinó empleando la metodología propuesta por Justes et al. (1994), ajustada por nivel crítico de INN ( $INN_{crítico}$ ) para rendimiento relativo (RR). La validación de INN como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33, empleo 6 experimentos independientes e implicó 3 niveles (aciertos, error tipo I y II). Los ambientes de producción para estimar y diferenciar la BR se identificaron mediante CART (*Classification and Regression Tree*) (Breiman et al., 1984; De'ath y Fabricius, 2000). La respuesta al agregado de N en Z.33 se cuantificó en dos experimentos en faja en chacras comerciales de trigo durante 2015/16, captando variaciones en la disponibilidad de N por el suelo. Se contrastó un testigo absoluto sin agregado de N (Ta), un testigo tecnológico con agregado de N en base al modelo actual (Tt) y un tratamiento homólogo al anterior más 50 unidades de N en Z.33 (Tt+50). Se utilizó Urea azufrada (0-40-0+6S) a siembra y Z.22 y Solmix (0-37-0+7S) a Z.30 y Z.33. En cada faja se realizaron muestreos de NDVI en Z.33 utilizando sensor activo

*CropCircle™* en dos transectas longitudinales a la faja, distanciadas 5 metros entre sí y con lecturas cada 10 metros entre observaciones de la misma transecta. Además, se realizaron muestreos de rendimiento en grano cada 20 metros en una transecta al centro de cada faja, mediante cosecha manual de seis metros lineales en dos surcos de siembra. En ambos casos se registró la ubicación espacial con GPS.

## Resultados y discusión

### Diagnóstico de condición nitrogenada y brecha de rendimiento por nitrógeno a tres nudos en trigo

Con los muestreos comprendidos entre los estadios fenológicos Z.22 y Z.65 incluidos, de 28 experimentos se identificaron 37 niveles críticos de Nt. Los mismos, se ubicaron en el rango de 1,2% a 4,5%, con un rango de variación de MS entre 210 y 11500 kg ha<sup>-1</sup>. El modelo que mejor representó la relación alométrica entre las variables, fue de tipo potencial ( $N_{tc} = 3,36MS^{-0,31}$ ), logrando explicar el 81% de la variabilidad de Nt ( $p < 0,0001$ ) (Fig. 1a). Este modelo, describe la mínima concentración de Nt necesaria para obtener la máxima producción de MS en el estadio fenológico correspondiente. Se utilizó la CDN para estimar el Ntc y calcular el INN en Z.33. El INN se relacionó con el RR siguiendo un modelo no lineal de dos tramos con *plateau*. La fase lineal ( $R^2 = 0,74$ ) presentó coeficiente beta de 0,65 ( $p < 0,0001$ ) y coeficiente gamma de

1,24, correspondiente al  $INN_{crítico}$  ( $p < 0,0001$ ). Por debajo de este valor existió incremento lineal en el RR en respuesta a la mejora en el INN, mientras que por encima el RR fue 0,94. Los valores de  $INN \geq 1,24$  indicaron que el cultivo se encontró en una situación de N no limitante para maximizar rendimiento en grano, mientras que los valores de  $INN < 1,24$  indicaron condiciones deficitarias de N.

En la Figura 1a se presenta la CDN ajustada siguiendo la metodología propuesta por Justes et al. (1994), y la  $CDN_{corregida}$  para maximizar la producción de grano ( $N_{tc} = 4,17MS^{-0,31}$ ). Esta última presentó igual coeficiente de dilución de N ( $b = 0,31$ ), pero una concentración de N para  $MS = 1000 \text{ kg ha}^{-1}$  24% superior a CDN ( $a = 3,36$  vs  $a = 4,17$ , para CDN y  $CDN_{corregida}$  respectivamente), indicando una mayor exigencia en el requerimiento de N para maximizar rendimiento en grano en contraste a los requerimientos para maximización de producción de biomasa aérea.

La validación realizada con los 6 experimentos independientes mostró que la  $CDN_{corregida}$  logró predecir de forma acertada la respuesta al agregado de N en Z.33, siendo un 2% superior a CDN. Mientras que el error tipo I, definido como situaciones identificadas como de respuesta positiva en las que no la hubo, fue igual utilizando las dos opciones (CDN y  $CDN_{corregida}$ ), el error tipo II, definido como situaciones identificadas como sin respuesta al agregado de N en Z.33, pero que sí la hubo, fue 4% inferior utilizando  $CDN_{corregida}$ . Estos resultados demuestran para las condiciones de estudio, la validez y utilidad del

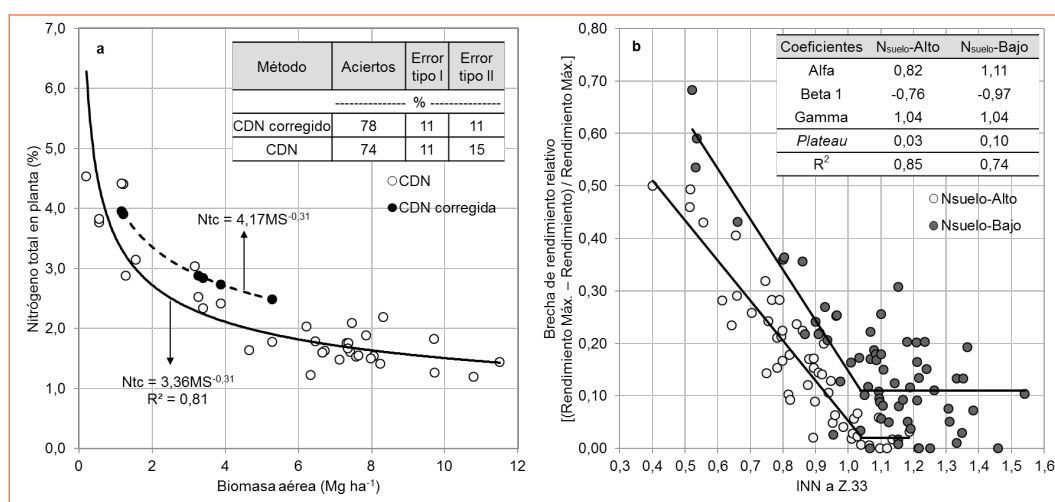


Figura 1. a) Curvas de dilución de nitrógeno y validación de niveles críticos de INN como predictores de respuesta al agregado de N en Z.33. b) Brecha de rendimiento generada por deficiencias de N en Z.33 en ambientes de alto y bajo aporte de N del suelo.

INN como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33, estimado en base a la  $CDN_{\text{corregida}}$ .

Mediante algoritmo de segmentación recursiva por el procedimiento CART, se identificaron dos grupos de comportamiento diferencial, determinados por INN y  $N_{\text{suelo}}$ . Los sitios en los que el Ta generó rendimientos menores a  $2917 \text{ kg ha}^{-1}$  se clasificaron como ambientes de bajo aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo}}$ -Bajo), y las que lograron rendimientos mayores o iguales a  $2917 \text{ kg ha}^{-1}$  se definieron como ambientes de alto aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo}}$ -Alto). Estos ambientes se asocian a la capacidad de aporte de N por parte del suelo, ya que el N absorbido por el cultivo a Z.33 tiende a ser mayor a medida que el rendimiento aumenta en los Ta, a una tasa de  $20 \text{ kg N ha}^{-1}$  ( $p < 0,0001$ ,  $R^2 = 0,86$ ) por cada tonelada de incremento en el rendimiento (datos no mostrados). En  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo, el cultivo a Z.33 absorbió en promedio  $29 \text{ kg N ha}^{-1}$  con CV de 20,5%, mientras que en  $N_{\text{suelo}}$ -Alto se absorbieron en promedio  $55 \text{ kg N ha}^{-1}$  con CV de 25,3%. La BR presentó diferente magnitud y tendencia entre ambientes de aporte de N. En ambos casos, los coeficientes gamma fueron 1,04 y el *plateau* fue 0,03 y 0,10 para  $N_{\text{suelo}}$ -Alto y  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo respectivamente (Fig. 1b).

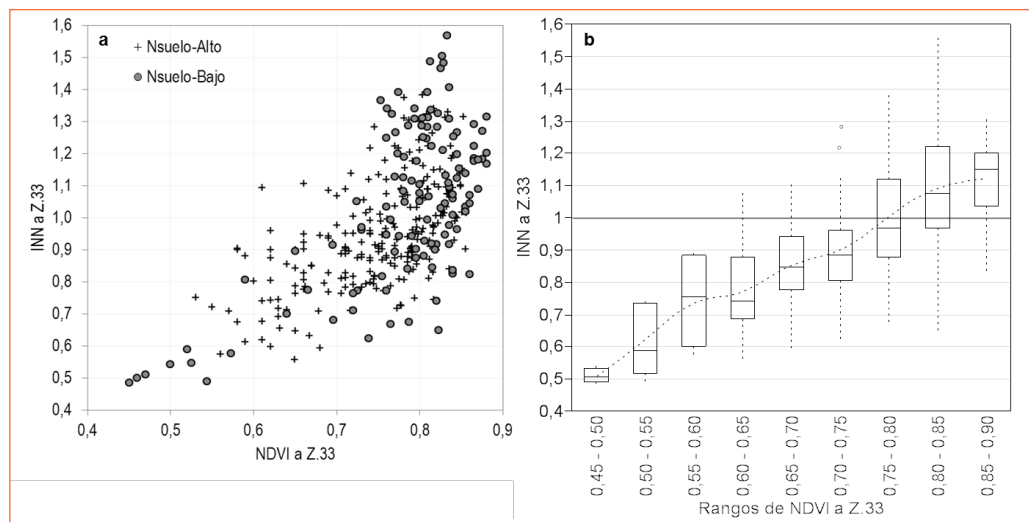
### Respuesta al nitrógeno en tres nudos en trigo y capacidad del NDVI para estimar INN

Para rendimientos medios del Ta de  $3205 \text{ kg ha}^{-1}$  en  $N_{\text{suelo}}$ -Alto y  $2466 \text{ kg ha}^{-1}$  en  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo, la respuesta en rendimiento media del Tt fue de

$1974 \text{ kg ha}^{-1}$  con CV 15% y  $2011 \text{ kg ha}^{-1}$  con CV 24% para  $N_{\text{suelo}}$ -Alto y  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo respectivamente, mientras que en Tt+50 la respuesta media fue de  $2436 \text{ kg ha}^{-1}$  con CV 17% y  $2214 \text{ kg ha}^{-1}$  con CV 24% para  $N_{\text{suelo}}$ -Alto y  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo respectivamente. Lo que representó una diferencia media entre respuesta de Tt y Tt+50 de  $462 \text{ kg ha}^{-1}$  a favor de Tt+50 en  $N_{\text{suelo}}$ -Alto ( $p < 0,0001$ ) y  $203 \text{ kg ha}^{-1}$  a favor de Tt+50 en  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo ( $p = 0,0005$ ).

No fue posible ajustar un modelo preciso para estimar de forma indirecta el INN empleando NDVI a Z.33, ya que para los datos disponibles la magnitud del margen de variación del INN fue alta para los valores de NDVI ( $R^2 = 0,45$ ). Aún evaluando las relaciones en forma independiente entre ambientes de capacidad de aporte de N del suelo, la variación continuo siendo elevada. En  $N_{\text{suelo}}$ -Alto, el modelo que mejor representó la relación, presentó un  $R^2$  de 0,37 y en  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo fue de 0,52.

A pesar de no existir un modelo matemático preciso que permita estimar INN empleando NDVI (Fig. 2a), este último permitió saber cuál fue el comportamiento de INN mediante niveles de probabilidad acumulada. Esto surge al estudiar la tendencia que presenta el INN en función del NDVI agrupado en rangos cada 0,05 desde 0,45 a 0,90 (Fig. 2b). La evolución de tendencia de INN en función de rangos de NDVI para los dos ambientes, presentó un comportamiento similar por lo que se consideraron ambas en forma general (Fig. 2b).

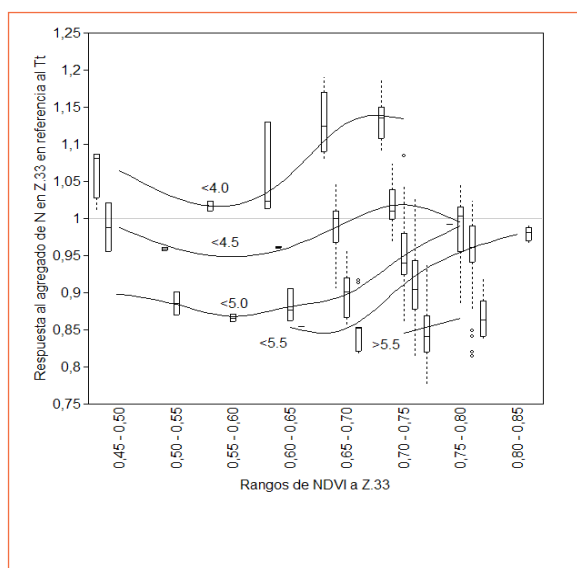


**Figura 2.** a) Capacidad del NDVI como estimador de INN para diagnostico indirecto de deficiencia nitrogenada en Z.33 en ambiente de bajo aporte de N del suelo. b) Tendencia general entre INN y NDVI en Z.33.



La respuesta al agregado de N en Z.33 expresada en términos relativos al Tt, presentó una variabilidad comprendida entre 0,77 y 1,19 con media 0,95 y CV 9,4%. Esta variabilidad se redujo a nivel de rangos de rendimiento alcanzable (Fig. 3). Cuando el rendimiento alcanzable se encontró entre 4,0 y 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> la respuesta fue nula (respuesta relativa = 1), sin embargo, si fue menor a 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> se observaron respuestas negativas respecto al Tt (respuesta relativa > 1), tendiendo a incrementarse conforme aumentó la magnitud del NDVI. Para rendimientos alcanzables mayores a 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>, se registraron respuestas positivas respecto al Tt (respuesta relativa < 1) y de mayor magnitud cuanto mayor fue el rendimiento alcanzable. En cada grupo de rendimiento alcanzable la respuesta tendió a reducirse en rangos de NDVI muy bajos (menores a 0,50) o muy altos (mayores a 0,75) (Fig. 3).

La respuesta al N en Z.33, fue incremental ante aumentos en el rendimiento alcanzable, probablemente porque en ausencia de otros factores limitantes, la respuesta a la fertilización nitrogenada se relaciona en forma directa con la demanda del nutriente, la cual se incrementa al aumentar el rendimiento alcanzable. En cada rango de rendimiento alcanzable, a excepción del mayor a 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> para el cual no se dispuso de suficientes datos, el comportamiento sigmoide de las curvas medias presentó un punto de inflexión en el rango 0,55-0,60 de NDVI. Este rango representa la máxima respuesta observada (Fig. 3). Para valores de NDVI menores a 0,50,



**Figura 3.** Respuesta al agregado de nitrógeno a Z.33 en base a diagnóstico por NDVI.

es probable que existieran otros factores limitantes o la magnitud de la deficiencia nitrogenada ocurriera por un período de tiempo prolongado. Si bien existió respuesta al agregado de N, la misma tendió a decrecer, por lo que las necesidades de fertilizante nitrogenado serían menores. En condiciones de rendimiento alcanzable superiores a 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>, no podemos afirmar esto ya que no se dispuso de datos en esa región de NDVI.

Las diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) en la magnitud de la respuesta para un mismo rango de NDVI entre los niveles de rendimiento alcanzable (datos no mostrados), confieren rigurosidad a las tendencias encontradas en el modelo semi-empirico de estimación de respuesta al agregado de N en Z.33 mediante NDVI. Sin embargo, para rendimientos alcanzables mayores a 5,0 Mg ha<sup>-1</sup> no se dispuso de datos de respuesta en rangos de NDVI menores a 0,60 y para rendimientos alcanzables mayores a 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> en rangos de NDVI menores a 0,70. En estas secciones del modelo se podría esperar la misma tendencia en la respuesta, y por tanto extrapolarla, pero no disponemos de información suficiente que lo asegure.

La respuesta en rendimiento al agregado de N generalmente es de tipo cuadrática, definiendo una dosis óptima de N a partir de la cual la respuesta comienza a decrecer. Siendo que la dosis óptima y por tanto la respuesta al agregado de N en cereales depende del rendimiento alcanzable, en el caso del rango de rendimiento alcanzable <4,0 Mg ha<sup>-1</sup>, la dosis óptima podría ser la correspondiente a Tt, por lo que el agregado de N suplementario en Z.33 generó una reducción en la respuesta. Esto puede estar dado por condiciones de producción que llevan a un escaso crecimiento a inicio de encañazón, reduciendo el potencial y por tanto aumentando la brecha de rendimiento, sin que las medidas posteriores logren reducirla de forma eficiente.

## Conclusiones

La CDN ajustada por nivel crítico de INN, permitió identificar situaciones de respuesta a N en Z.33 y reducir la BR por deficiencia de N. Esta herramienta complementa y mejora el actual modelo de diagnóstico y corrección de deficiencias nitrogenadas en Uruguay, estimando la respuesta mediante rangos de NDVI y rendimiento esperado. Sin agregado de N posterior a Z.30,

cuanto mayor fue la deficiencia nitrogenada a Z.33, se incrementa la BR y esta se define en base al aporte de N del suelo. La evidencia de respuesta al agregado de N en Z.33 en relación al testigo tecnológico (modelo actual), genera antecedentes para la hipótesis de que el manejo de N en trigo que no cuantifique el estado nutricional nitrogenado posterior a Z.30, limita el rendimiento principalmente en ambientes de elevado potencial.

## Bibliografía

- Berger A., Gaso D., Calistro R., y Morales M.** 2018. Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. En: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A. (Eds.). Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». 27-28-29 de Agosto 2014. INIA La Estanzuela. Colonia, Uruguay. Serie técnica No. 241, pp. 112-123. ISBN 978-9974-38-406-4
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R.A., y Stone C.J.** 1984. Classification and Regression Trees. Chapman and Hall (Wadsworth, Inc.), New York, NY, USA, 254 pp.
- Chen P.** 2015. A comparison of two approaches for estimating the wheat nitrogen nutrition index using remote sensing. *Remote Sens*, 7:4527 – 4548. doi:10.3390/rs70404527.
- Cilia C., Panigada C., Rossini M., Meroni M., Busetto L., Amaducci S., Boschetti M., Picchi V., y Colombo R.** 2014. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sens*, 6:6549 – 6565.
- De'ath G., y Fabricius K.E.** 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 81:3178 – 3192.
- Fitzgerald G., Rodríguez D., y O'Leary G.** 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index -The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research* 116:318 - 324.
- Franzluebbers A.J., Sawchik J., y Taboada M.A.** 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture and crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190: 18 - 26, doi: 10.1016/j.agee.2013.09.017.
- Hoffman E., Perdomo C., Ernst O., Bordolli M., Pastorni M., Pons C., y Borghi E.** 2010. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI*, 46: 13-18.
- Hoffman E., Fassana N., Mazzilli S., Berger A., y Ernst, O.** 2015. La productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno. En: Ribeiro, A.; Barbazan, M. [Eds.] IV Simposio Nacional de Agricultura. VII Encuentro de la SUCS. I Encuentro Regional de Políticas de Conservación de Suelos. Buscando del camino para intensificación sostenible para la agricultura. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. Hemisferio Sur. 131-140.
- Hoffman E., Locatelli A., Fassana N., Viega L., y Castro A.** 2018. Evaluación de la evolución de la oferta varietal de trigo en Uruguay en el siglo XXI. En: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A. (Eds.). Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». 27-28-29 de Agosto 2014. INIA La Estanzuela. Colonia, Uruguay. Serie técnica No. 241, pp. 99-111. ISBN 978-9974-38-406-4.
- Justes E., Mary B., Meynard J., Machet J., y Thellier-Huches L.** 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany* 74: 397-407.
- Lukina E.V., Freeman K.W., Wynn K.J., Thomason W.E., Mullen R.W., Stone M.L., Solie J.B., Klatt A.R., Johnson G.V., Elliott R.L., y Raun W.R.** 2001. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *J. Plant Nutr.*, 24:885 – 898.
- Mistele B., y Schmidhalter U.** 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *Eur. J. Agron.*, 29:184 – 190.
- Morón A., y Quincke A.** 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. INIA. Uruguay. Jornada Técnica. El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Actividades de difusión 605, 5-9.
- Rodríguez D., Fitzgerald G.F., Belford R., y Christensen L.K.** 2006. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57:781 – 789.
- Sadras V.O., Hayman P.T., Rodríguez D., Monjardino M., Bielich M., Unkovich M., Mudge B., y Wang E.** 2016. Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: physiological agronomic, economic, breeding and modelling perspectives. *Crop & Pasture Science*, 67: 1019 - 1053.
- Wingeyer A.B., Amado T., Pérez-Bidegain M., Studdert G.A., Perdomo Varela C.H., García F.O., y Karlen D.L.** 2015. Soil quality impacts of current South American. *Sustainability*, 7: 2213 - 2242, doi: 10.3390/su7022213. ◀

## Absorción de N y S en cebada: relaciones con rendimiento y proteína

Gómez Federico<sup>1,2</sup>; Boero José<sup>1,2</sup>, Prystupa Pablo<sup>1,2</sup>, Ferraris Gustavo<sup>3</sup>, Gutiérrez Boem Flavio<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Av. San Martín 4453. CABA. Argentina. <sup>2</sup> INBA – CONICET. <sup>3</sup> EEA Pergamino, INTA. [fgomez@agro.uba.ar](mailto:fgomez@agro.uba.ar)

### Introducción

En Argentina, el destino tradicional del cultivo de cebada es la industria maltero-cervecera. La industria maltera y cervecera es altamente exigente en términos de contenido proteico: se requieren valores de entre 10% y 12%. En experimentos llevados a cabo en la región pampeana se ha observado que el contenido proteico de los granos se asoció positivamente con la disponibilidad de nitrógeno (N) y negativamente con el rendimiento (Prystupa et al., 2016). Para alcanzar un contenido proteico entre el 10% y el 12% se debe contar en el suelo con 22 y 40 kg ha<sup>-1</sup> de N disponible por tonelada de rendimiento en grano (Prystupa et al., 2008). Hay poca información para cebada y cultivos afines (i.e. trigo) respecto de la relación entre disponibilidad o absorción de azufre (S) por el cultivo y la concentración de S en el grano.

La pendiente de la relación entre rendimiento y nutriente absorbido se conoce como eficiencia de utilización (EU = R NUabs<sup>-1</sup>, R: rendimiento, NUabs: nutriente absorbido). La EU puede ser afectada por el nivel de rendimiento alcanzado. Esta se asume lineal y constante cuando el rendimiento no está cerca del potencial del sitio y cae por encima del 70-80% del rendimiento máximo (Dobermann y Cassman, 2002). La EU también puede caer con alta disponibilidad del nutriente en el suelo, que lleva a un aumento en la absorción sin un aumento proporcional en el rendimiento (i.e. consumo de lujo), o por estreses ambientales (van Keulen y van Heermst, 1982). La inversa de la EU es el requerimiento (NUabs R<sup>-1</sup>). Este cociente se puede descomponer en dos componentes con sentido agronómico: la concentración del nutriente en el grano (NUgrano R<sup>-1</sup>), y la inversa del índice de cosecha (IC) del nutriente (NUabs NUgrano<sup>-1</sup>):

$$\left( \frac{NUabs}{R} \right) = \left( \frac{NUgrano}{R} \right) * \left( \frac{NUabs}{NUgrano} \right)$$

Esta relación implica que un aumento de la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento llevaría a tener una mayor concentración del nutriente en el grano, siempre y cuando el IC del nutriente se mantuviera constante.

En un experimento de fertilización de cebada con N y S se observó que, a diferencia del N, la concentración de S en el grano fue poco sensible a cambios en la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento, debido a grandes cambios en el ICS (Gutiérrez Boem et al., 2014). Esto pudo deberse a la distinta abundancia relativa de los dos nutrientes en ese experimento (i.e. el rendimiento del cultivo respondió a la aplicación de N y no a la de S), o a que la relación entre la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento y la concentración del nutriente en el grano es distinta para N y S. Si la concentración de S en el grano fuera poco sensible a cambios en la cantidad de azufre absorbido por unidad de rendimiento, sería muy difícil intentar cambiar la concentración de S (y la relación N:S) del grano vía fertilización azufrada. El objetivo de este trabajo fue determinar la relación entre la concentración de N y S en el grano, el ICN, ICS y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento.

### Materiales y métodos

Se realizaron 49 experimentos durante un periodo de 4 años (2014/17) en el centro-norte de la provincia de Buenos Aires sobre lotes en producción. Los tratamientos se realizaron sobre la fertilización que realizó cada productor en el lote de producción (Control) y constaron de:

**Control** (sin agregado de fertilizante adicional al realizado por el productor), **N**: sin limitaciones de N, **S**: sin limitaciones de S, **NS**: sin limitaciones de N y S. En los experimentos realizados durante las campañas 2014 y 2015 no se incluyó el tratamiento NS. En el periodo 2016/17 se agregó el tratamiento NS de manera de conformar un experimento factorial completo.

Las dosis utilizadas en los tratamientos se describen en la **Tabla 1**. Las dosis de fertilización correspondientes a los tratamientos N, S y NS se aplicaron en el periodo comprendido entre la siembra y la emergencia del cultivo.

Los tratamientos se dispusieron en bloques completos aleatorizados. La fuente de N utilizada fue urea y la de S fue yeso. En madurez del cultivo se cosecharon 4 metros lineales ( $\sim 0.84 \text{ m}^2$ ) del cultivo por parcela, se secaron a  $60^\circ\text{C}$  y se trillaron. Se determinó biomasa aérea, rendimiento en grano, y el número y peso individual de los granos. La concentración de N y S en los granos y rastrojo se determinó mediante una digestión húmeda y una posterior colorimetría (N) o turbidimetría (S). El rendimiento se expresó con 13% de humedad, mientras que la concentración de nutrientes se expresó en base seca.

La relación entre el rendimiento y la cantidad de nutriente absorbida fue ajustada a través de un modelo esférico condicional a través de regresiones por cuantiles (Koenker, 2018; R Core Team, 2018). La función esférica condicional puede describirse a través de:

$$y = \begin{cases} b * \left( \left( \frac{3}{2} \right) * \left( \frac{x}{c} \right) - \left( \frac{1}{2} \right) * \left( \frac{x}{c} \right)^3 \right), & \text{si } x \leq c \\ b, & \text{si } x > c \end{cases}$$

donde  $y$  es el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $x$  es la cantidad de nutriente absorbido ( $\text{kg nutriente ha}^{-1}$ ),  $b$  es el rendimiento potencial ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y  $c$  es la mínima cantidad de nutriente absorbido ( $\text{kg nutriente ha}^{-1}$ ) con la cual se alcanza el rendimiento potencial.

El análisis de varianza general y los contrastes fueron realizados a través de modelos mixtos (Bates et al., 2015), donde se consideró a los experimentos y los bloques anidados en los experimentos como efectos aleatorios.

## Resultados y discusión

Los rendimientos variaron entre 1735 y 9317  $\text{kg ha}^{-1}$ , lo cual reflejó la variabilidad de los ambientes explorados. El incremento promedio de rendimiento ante el agregado de N y S fue de 775 y 248  $\text{kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Se observó una respuesta al agregado de N en 16 de los 49 ensayos, con un incremento promedio del rendimiento en estos experimentos de 1675  $\text{kg ha}^{-1}$ . Por otro lado, el efecto de la fertilización con S y/o la interacción N x S fueron observados en 5 experimentos de los 49 realizados. El agregado de S sólo no tuvo un efecto generalizado en toda la red (i.e. se observó efecto del agregado de S en un sólo sitio).

El rango de concentraciones de N en grano explorado estuvo comprendido entre 7.1 y 23.4  $\text{g N kg}^{-1}$ , lo que correspondió a un rango de contenido proteico en grano de 4.4-14.6%. Cabe destacar que el 75% de los productores obtuvieron valores de contenido proteico en granos menores a 8.8%. El contenido de S en grano exploró un rango comprendido entre 0.6 y 1.4  $\text{g S kg}^{-1}$ . El rango observado de la concentración de S en grano fue menor que en el caso de N (i.e. la relación entre la concentración máxima y mínima fue de 2.3 y 3.3 para S y N, respectivamente). La concentración de N en grano aumentó  $\sim 32\%$  ante el agregado de N, mientras que la concentración de S en grano incrementó  $\sim 12\%$  frente al agregado de S.

Los rangos observados de nutriente absorbido por el cultivo fueron similares para N y S (máx/mín: 8.0 y 7.6 para N y S, respectivamente). Tanto el ICN como el ICS se redujeron frente al agregado de N y S, respectivamente. El requerimiento de ambos nutrientes (nutriente absorbido por tonelada de rendimiento) aumentó frente al agregado de los respectivos nutrientes (i.e. 46.5% y 22% para N y S, respectivamente). La relación N:S en

**Tabla 1.** Tratamientos y dosis utilizadas en la red de experimentos

Año	Tratamientos	Dosis de N utilizada en tratamientos N y NS ( $\text{kg N ha}^{-1}$ )	Dosis de S utilizada en tratamientos S y NS ( $\text{kg S ha}^{-1}$ )
2014	Control / N / S	150	15
2015	Control / N / S	150	15
2016	Control / N / S / NS	150	15
2017	Control / N / S / NS	250	20



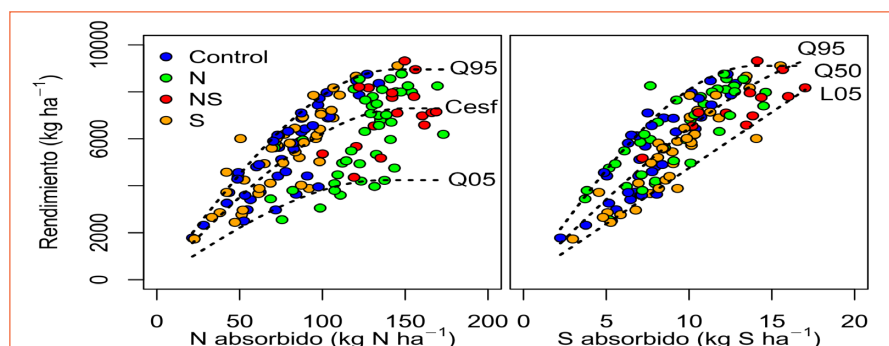
grano aumentó  $\sim 24\%$  frente al agregado de N y disminuyó  $\sim 9\%$  frente al agregado de S.

Las funciones de borde superior (i.e. Q95) corresponden a las situaciones de máximos rendimientos obtenidos para las distintas cantidades de N y S absorbido por el cultivo (Figura 1). Estas funciones permiten caracterizar las situaciones de máxima dilución de un nutriente determinado en todo su rango, y en su fase lineal o aproximadamente lineal, a las condiciones de deficiencia donde se maximiza la eficiencia de utilización de dicho nutriente. Las funciones de borde inferior (i.e. L05 y Q05) corresponden a las situaciones de mínimos rendimientos para las distintas cantidades de nutriente absorbido y se puede interpretar como de mínima eficiencia de utilización (Figura 1), asociadas a condiciones donde el rendimiento del cultivo estuvo limitado por otro factor además del nutriente que se está evaluando, o bien, a situaciones de "consumo de lujo" del nutriente en cuestión (Setiyono et al., 2010).

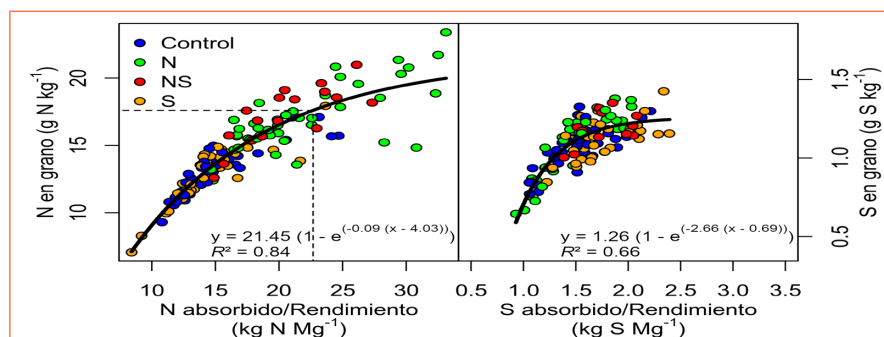
En el caso de la función de borde superior que relaciona el rendimiento y la cantidad de N absorbido por el cultivo, se alcanzó un plateau de rendimiento de  $8950 \text{ kg ha}^{-1}$  cuando el cultivo absorbió  $143 \text{ kg N ha}^{-1}$ . La EU de N máxima y mínima estimadas, considerando el tramo lineal de la curva (hasta el 75% del plateau), fueron  $83.7$  y  $41.4 \text{ kg kg N absorbido}^{-1}$  (Q95 y Q05, respectivamente). Los requerimientos mínimos y máximos estimados fueron  $11.9$  y  $24.1 \text{ kg N t}^{-1}$ . En términos medios, el rendimiento alcanzó un plateau de  $7298 \text{ kg ha}^{-1}$  cuando el cultivo absorbió  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$ . La EU de N media estimada fue  $65.4 \text{ kg kg N absorbido}^{-1}$  (i.e. los requerimientos de N medios fueron  $15.3 \text{ kg N t}^{-1}$ ).

En el caso de S, el rendimiento alcanzó un plateau de  $9105 \text{ kg ha}^{-1}$  cuando el cultivo absorbió  $14 \text{ kg S ha}^{-1}$ . La EU de S máxima y mínima estimadas fueron  $874.3$  y  $475.4 \text{ kg grano kg S absorbido}^{-1}$  (Q95 y L05, respectivamente). Los requerimientos de S mínimos y máximos estimados fueron  $1.1$  y  $2.1 \text{ kg S t}^{-1}$ .

La EU de S media estimada fue  $848 \text{ kg kg S absorbido}^{-1}$  (i.e. los requerimientos de S medios fueron  $1.18 \text{ kg S t}^{-1}$ ). A diferencia de N, la función de borde inferior presentó una forma lineal (i.e. no se observó un plateau definido).



**Figura 1.** Relación entre el rendimiento y la cantidad de nutriente absorbido para N y S, respectivamente. Q95, Q50 y Q05 corresponden a las líneas de borde del cuantil 95, 50 y 5%, respectivamente. Cesf corresponde al ajuste de la función esférica por mínimos cuadrados. L05 corresponde a la línea de borde del cuantil 5%.

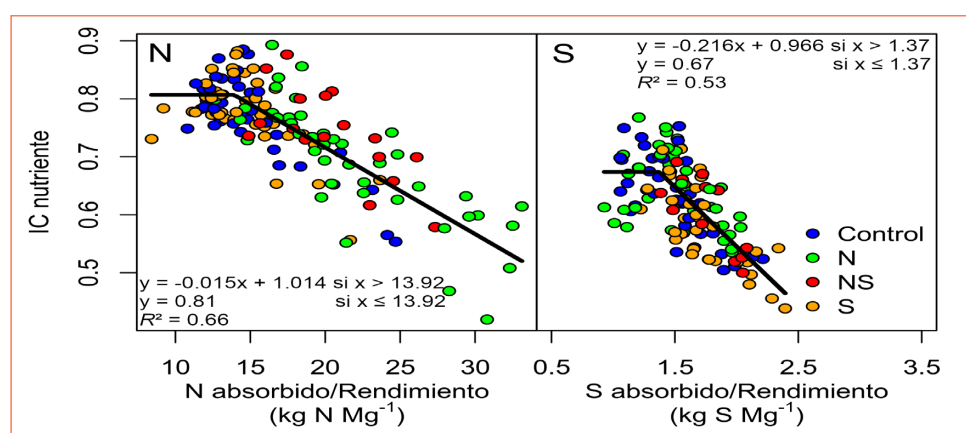


**Figura 2.** Relación entre la concentración de nutriente en grano y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento para N y S, respectivamente. La línea punteada indica la concentración de N en grano que se corresponde con un contenido proteico en granos de 11% y la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento necesaria para obtenerlo.

Tanto para N como para S, se observó una relación curvilínea entre la concentración de nutriente en grano y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento (**Figura 2**). En el caso de N, a diferencia de lo observado por Prystupa et al. (2016), la relación entre estas variables fue más estrecha, esto último asociado a que, al determinar la cantidad de N absorbido, no se tienen en cuenta las pérdidas del fertilizante aplicado. Para obtener granos con contenido proteico de 11% ( $17.6 \text{ g N kg}^{-1}$ ) es necesario que el cultivo absorba  $\sim 22.7 \text{ kg N t}^{-1}$  rendimiento<sup>-1</sup> (**Figura 2**). La relación entre la concentración de S en grano y la cantidad de S absorbido por unidad de rendimiento presentó mayor variabilidad que la de N (**Figura 2**). Por otro lado, el incremento de la abundancia de S en el cultivo (i.e. S absorbido por unidad de rendimiento) no siempre se tradujo en un incremento de la concentración de S en el grano (**Figura 2**), debido a que se alcanzó un plateau en la concentración de S en el grano para valores altos de S absorbido por unidad de rendimiento.

El IC de ambos nutrientes se relacionó de forma lineal con la abundancia de los respectivos nutrientes hasta alcanzar un plateau. Si bien ambas relaciones en su fase lineal fueron negativas, las tasas de disminución fueron muy contrastantes (**Figura 3**).

En términos relativos, un incremento del 50% en la cantidad de nutriente absorbido por tonelada de rendimiento por encima de los correspondientes puntos de inflexión, produjo una disminución del 12% y 22% en el ICN e ICS, respectivamente (**Figura 4**).

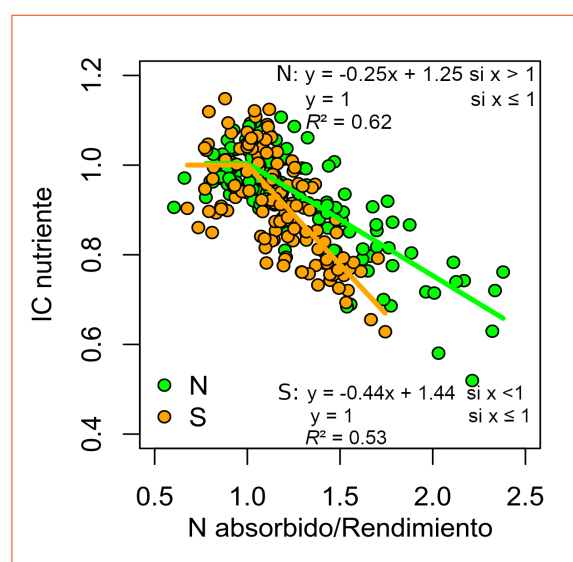


**Figura 3.** Relación entre el índice de cosecha de nutriente y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento para N y S, respectivamente.

La asociación entre la relación N:S en grano y la cantidad de N absorbido por unidad de rendimiento fue lineal y positiva, mientras que no se presentó asociación entre estas variables en el caso de S (**Figura 5**).

## Conclusiones

Tanto la fertilización con N como con S produjeron un incremento en la abundancia de los respectivos nutrientes en el cultivo (i.e. N y S absorbido por unidad de rendimiento). El aumento en el N absorbido por unidad de rendimiento se asoció de manera positiva con la concentración



**Figura 4.** Relación entre el IC de nutriente y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento, relativos a los respectivos puntos de inflexión, para N y S.

de N en grano, mientras que, en el caso de S, la concentración de S en grano tiende a alcanzar rápidamente un plateau frente a un aumento del S absorbido por unidad de rendimiento. Por lo tanto, la concentración de S en grano fue menos sensible que la de N a cambios en la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento. Esto se debió en gran medida a una gran disminución del ICS frente al aumento de la abundancia de S en el cultivo, a diferencia de lo observado en el caso de N. Por tanto, la relación N:S en grano resultó estar asociada a la abundancia de N en el cultivo.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la colaboración de los productores y asesores: Alejandro Alegre, Carlos Gutiérrez, Emilio Secreto, Gustavo Franco, Jorge Álvarez, Nicolás Casella, Sebastián Arias, Ricardo Falconi, Gustavo Herrá, Marcelo Sabione, Roberto Carral, Esteban Marré, Gabriel Longinotti e Ignacio Alzueta. Esta investigación fue financiada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT-2013-1846, PICT-2016-2323) y la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020130100746BA).

## Bibliografía

- Bates D., M. Maechler, B. Bolker, S. Walker. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67: 1-48.
- Dobermann A., y K.G. Cassman. 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant Soil*. 247: 153-175.

- Gutiérrez Boem F.H., F. Gómez, C. Caputo y P. Prystupa. 2014. Fertilización de cebada: I. eficiencia de utilización y concentración de N-P-S en grano. XXIV CACS, Bahía Blanca, mayo.
- Koenker, R. 2018. quantreg: Quantile Regression. R package version 5.38. <https://CRAN.R-project.org/package=quantreg>.
- Prystupa P., R. Bergh, G. Ferraris, T. Loewy, L. Ventimiglia, F.H. Gutiérrez Boem y L. Couretot. 2008. Fertilización nitrogenada y azufrada en cebada cervicera cv. Scarlett. *IA del Cono Sur* 38: 5-11.
- Prystupa, P., G. Ferraris, L. Ventimiglia, T. Loewy, L. Couretot, R. Bergh y F.H. Gutiérrez Boem. 2016. Fertilización nitrogenada y azufrada de cebada cervicera cv. Scarlett en la provincia de Buenos Aires: I. Efectos sobre el rendimiento y el contenido proteico de los granos. *IA de Hispanoamérica* 21: 7-14.
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Setiyono T., D. Walters, K. Cassman, C. Witt y A. Dobermann. 2010. Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crops Res.* 118: 158-168.
- van Keulen H., y H.D.J. van Heermst. 1982. Crop response to the supply of macronutrients. *Agric. Res. Rep.* 916, C. Agric. Publ. Doc., Wageningen, 45 p. ◀

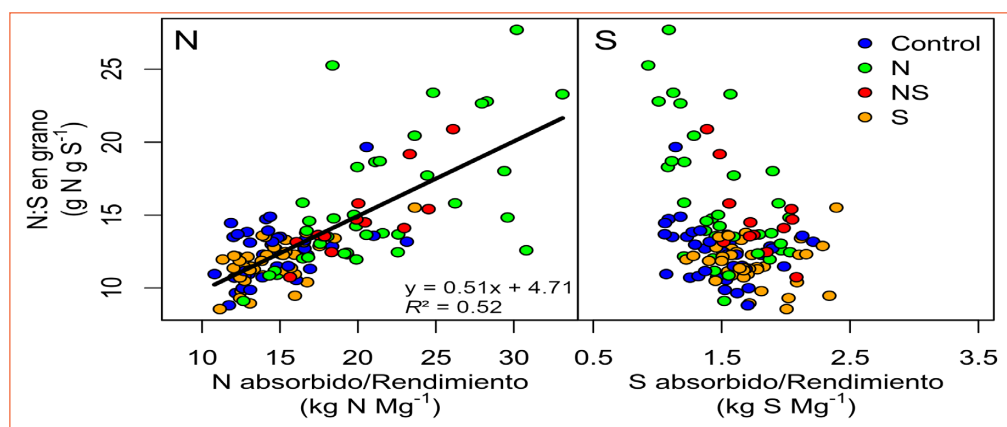


Figura 5. Relación entre las concentraciones N:S en grano y la cantidad de nutriente absorbido por unidad de rendimiento para N y S, respectivamente.

# Estrategias de manejo de la nutrición nitrogenada sobre el rendimiento y calidad de trigo pan

Amalia Manlla y Julio Castellarín

EEA INTA Oliveros

manlla.amalia@inta.gob.ar

## Introducción

Diversos estudios establecen que un manejo estratégico de la fertilización nitrogenada (dosis y momento de aplicación) contribuyen no solo a lograr altos rendimientos, sino también a obtener una buena calidad del grano (Howard, 2002). Por otro lado, es importante la condición del ambiente y la correcta elección del genotipo (García et al., 2015). Uno de los parámetros más usados para conocer la calidad del grano es el contenido de proteínas, este indicador está muy ligado a la disponibilidad de nitrógeno en el suelo durante el periodo crítico del cultivo. Con una disponibilidad media de nitrógeno se puede aumentar el rendimiento y el porcentaje de proteínas a la vez y con dosis altas de este nutriente se lograría incrementar aún más la concentración de proteínas (Quatrocchio et al., 2004). Además de la disponibilidad de nitrógeno y la variedad, otros factores como la temperatura durante el llenado de granos afectan los parámetros de calidad (Fraschina, 2017). Por ello es relevante realizar una nutrición balanceada del cultivo principalmente del nitrógeno, haciendo un uso eficiente de este insumo y de los recursos en general.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento y algunos parámetros de calidad (peso hectolitrico, gluten húmedo y porcentaje de proteínas) en dos grupos de calidad industrial (GC) de trigo pan, según dosis de nitrógeno, momento de aplicación y la aplicación de una fertilización foliar nitrogenada.

## Materiales y Métodos

El experimento se llevó a cabo en la localidad de Oliveros, Sur de Santa Fe durante dos años: 2017 (Año 1) y 2018 (Año 2). La siembra de los experimentos se realizó bajo el sistema de siembra directa sobre un suelo Argiudol Típico, serie Maciel de textura franco arcillo-limosa, con una historia agrícola de más de 30 años con 25 años en siembra directa, el cultivo antecesor fue soja de primera.

Se evaluaron dos variedades de ciclo largo que fueron seleccionadas según la clasificación del Comité de Cereales de Invierno de la Comisión Nacional de Semillas (CONASE) en los Grupos de Calidad (GC): ACA 360 (GC 1) y Klein Serpiente (GC 2). Las siembras fueron realizadas el 21/06/2017 y el 14/06/2018.

El diseño experimental fue de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones, la parcela principal corresponde a la variedad y la subparcela el tratamiento de dosis nitrogenada (DN), momento de fertilización y fertilización foliar (FF). A la siembra se fertilizó con P y S y las fuentes utilizadas fueron Fosfato Mono Amónico (MAP) y Sulfato de Calcio en dosis suficiente como para que estos nutrientes no sean limitantes.

Posteriormente se calculó el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) ajustado al 13,5% de humedad, el porcentaje de proteínas (% Prot), el porcentaje gluten húmedo (GH) y el peso hectolitrico (P:H).

El análisis de varianza y las diferencias de medias se realizaron con test de Tukey al 5%, utilizando el software INFO-STAT (2016).

En la **Tabla 1** se detallan todos los tratamientos que incluyen momento, dosis nitrogenada (DN) y fertilización foliar con N (FF). Los fertilizantes nitrogenados utilizados fueron Urea granulada y el foliar fue FoliarSol U.

## Resultados y Discusión

### Caracterización del clima

Las precipitaciones acumuladas entre los meses de mayo a noviembre fueron de 460 mm en el 2017 y de 620 mm en el 2018. Sin embargo, en el año 2, a pesar de superar el año 1 en un 25% más de lluvias, el mayor aporte de agua se dio en la etapa final del cultivo. Por lo tanto, desde la implantación del cultivo hasta el periodo de espigazón de este segundo año, la disponibilidad de agua fue una limitante, luego durante el llenado de granos atravesó un periodo de excesos hídricos.

En cuanto a las temperaturas máximas durante



**Tabla 1.** Tratamientos de fertilización con nitrógeno: dosis, momento y fertilización foliar en antesis.

Tratamientos	Dosis (kg ha <sup>-1</sup> ) y momentos de N
1	0 (Testigo)
2	50 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje (DN)
3	100 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje (DN)
4	200 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje (DN)
5	0 + 20 kg N ha <sup>-1</sup> foliar en Antesis (FF)
6	50 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje + 20 kg N ha <sup>-1</sup> foliar en Antesis (FF)
7	100 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje + 20 kg N ha <sup>-1</sup> foliar en Antesis (FF)
8	200 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje + 20 kg N ha <sup>-1</sup> foliar en Antesis (FF)
9	50 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje + 50 kg N ha <sup>-1</sup> Encañazón (DN)
10	100 kg N ha <sup>-1</sup> Macollaje + 100 kg N ha <sup>-1</sup> Encañazón (DN)

**Tabla 2.** Promedios de Rendimiento (RTO, kg ha<sup>-1</sup>), porcentaje de proteínas (%PROT), Gluten Húmedo (GH) y Peso Hectolitrico (P:H) por año y variedad. Análisis de la variancia y su significancia estadística. ES= error estándar.

	Variedad	RTO	% PROT	GH	P:H
AÑO 1	ACA 360	4973 B	12.8 B	31.1 B	79.3 B
	KS	5489 A	11.3 C	26.1 D	75.6 B
AÑO 2	ACA 360	3621 D	13.7 A	34.2 A	73.6 A
	KS	4302 C	11.2 C	28 C	75.2 B
	ES	58.22	0.08	0.25	0,61
	Tratamientos				
	1	3594 C	11,1 F	27 F	76,5 A
	2	4381 B	11,9 DE	28,9 DE	76,8 A
	3	4720 AB	12,3 BCD	30,0 BCD	75,5 A
	4	5048 A	13,0 A	31,8 A	75,8 A
	5	3879 C	11,5 EF	27,9 EF	75,5 A
	6	4740 AB	12,0 CDE	29,3 CDE	74,7 A
	7	4794 AB	12,4 ABCD	30,2 ABCD	76,6 A
	8	5021 A	12,7 AB	31,1 AB	75,4 A
	9	4705 AB	12,6 ABC	30,8 ABC	76,2 A
	10	5081 A	12,8 AB	31,3 AB	76,5 A
	ES	92,06	0.13	0.39	0.96
	Fuente	Probabilidades Test F			
	Año (A)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Variedad (V)	<0.01	<0.01	<0.01	NS
	DN	<0.01	<0.01	<0.01	NS
	FN	0.01	NS	NS	NS
	A*V	NS	<0.01	0.02	<0.01
	A*DN	<0.01	<0.01	<0.01	NS
	A*FN	NS	0.05	0.03	NS

la etapa de llenado de granos, en el año 1 manifestaron una tendencia similar a la serie histórica. En tanto que en el año 2 estas temperaturas máximas fueron 2,5°C por debajo del registro histórico durante las primeras etapas del cultivo (macollaje y encañazon).

El periodo de llenado de granos en ambos años tuvo una mayor amplitud térmica respecto a los años anteriores (14,5°C y 13,5°C), por lo que la duración de esta etapa se extendió unos días más, en consecuencia, se lograron mayores pesos en los granos (datos no publicados).

## Rendimiento

El máximo rendimiento promedio se logró en el primer año con 5230 kg ha<sup>-1</sup>, superando en un 25% al segundo año.

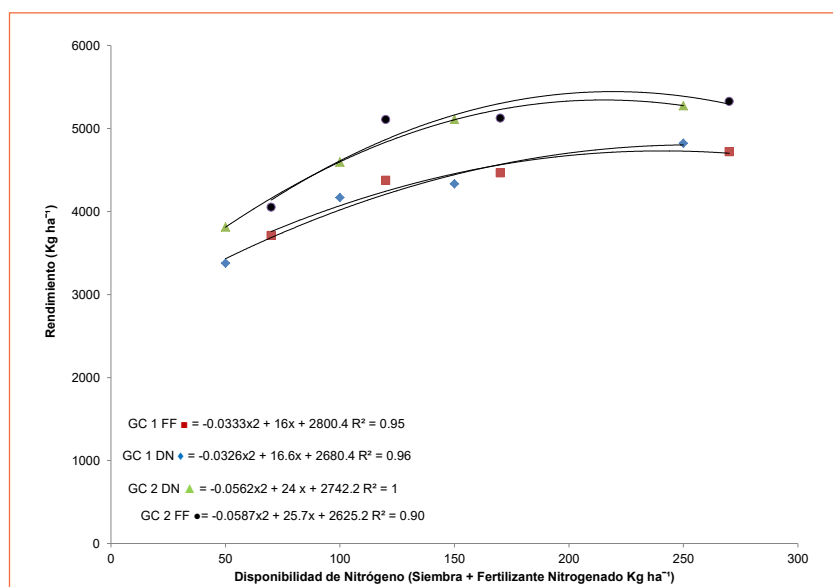
*Las medias seguidas por una misma letra no difieren significativamente según test de Tukey al 5 %*

Entre las variedades evaluadas, el mayor rendimiento se obtuvo con la variedad Klein Serpiente con 5489 y 4302 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 2), mientras que ACA 360 rindió 4973 y 3621 kg ha<sup>-1</sup> en ambos años. Las diferencias en el rendimiento de las variedades entre los años se debieron principalmente a la distribución de la oferta hídrica como se mencionó anteriormente. Las interacciones entre A\*V y A\*DN fueron altamente significativas

( $P < 0.01$ , Tabla 2). Klein Serpiente (KS) obtuvo el mayor rendimiento (6324 kg ha<sup>-1</sup>) con el tratamiento 8 del 2017, esto significó unos 2500 kg más respecto al testigo. Este incremento de rendimiento fue similar al encontrado por Manilla et al. (2017), en tanto que en el segundo año el máximo rendimiento se dio con el tratamiento 6 (4637 kg ha<sup>-1</sup>) y la diferencia con el testigo fue menor (864 kg). Por otro lado, la variedad ACA 360 maximizó su rendimiento con el tratamiento de mayor dosis nitrogenada aplicado a macollaje o tratamiento 4, sin embargo, fue un 12% inferior a KS en ambos años. Estas diferencias entre los genotipos utilizados se deben en parte a su capacidad para capturar el nitrógeno y traducirlo en rendimiento (Austin et al., 1980).

En la Figura 1, se observa una respuesta positiva del rendimiento al incremento en las dosis de nitrógeno en ambos GC, las magnitudes de estas respuestas al agregado del fertilizante foliar respecto a fertilizar todo en macollaje fueron mayores en los tratamientos de menores dosis (Testigo hasta los 100 y 100 + 20 FF kg N ha<sup>-1</sup>). La disponibilidad de nitrógeno explico entre un 90% y 99% la variación en el rendimiento.

Entre todos los tratamientos analizados, los máximos rendimientos promedios se alcanzaron en los tratamientos 10 (5081 kg ha<sup>-1</sup>), 4 (5048 kg ha<sup>-1</sup>) y 8 (5021 kg ha<sup>-1</sup>), correspondientes a las dosis máximas de fertilización conformando un



**Figura 1.** Rendimiento en función de la disponibilidad de Nitrógeno a la siembra más fertilizante nitrogenado. Rendimientos promedio para cada nivel de N en ambos GC.

grupo homogéneo sin diferencias significativas entre ellos (Tabla 2).

Respecto al momento de aplicación del fertilizante no hubo diferencias significativas en el rendimiento entre aplicar todo a macollaje o fraccionando entre macollaje y encañazon o con el agregado de un fertilizante foliar en antesis.

### **Parámetros de Calidad panadera: porcentaje de proteínas, Gluten húmedo y Peso Hectolítico.**

El promedio del porcentaje de proteínas y de gluten húmedo (GH) fue mayor en el año 2 (12,5% y 31,1%) en comparación con el año 1 (12,1% y 28,6%). Es de destacar que, en ambos años de estudio, el contenido de proteínas estuvo igual o por encima del valor de base de comercialización que es del 11% establecido según la norma de calidad para trigo pan-Norma XX.

El análisis de la varianza del porcentaje de proteína y de GH fueron significativos únicamente en las interacciones A\*DN y A\*variedad ( $P < 0.01$ , Tabla 2). Entre variedades, ACA 360, correspondiente al GC1, alcanzo el mayor valor de proteínas en ambos años con el tratamiento 4, superando en un 12% y 18% a KS (GC 2) El GH manifestó la misma tendencia que el contenido de proteínas respecto a los dos grupos de calidad.

Entre los tratamientos (DN y FF), los mayores valores de proteínas se dieron, independientemente

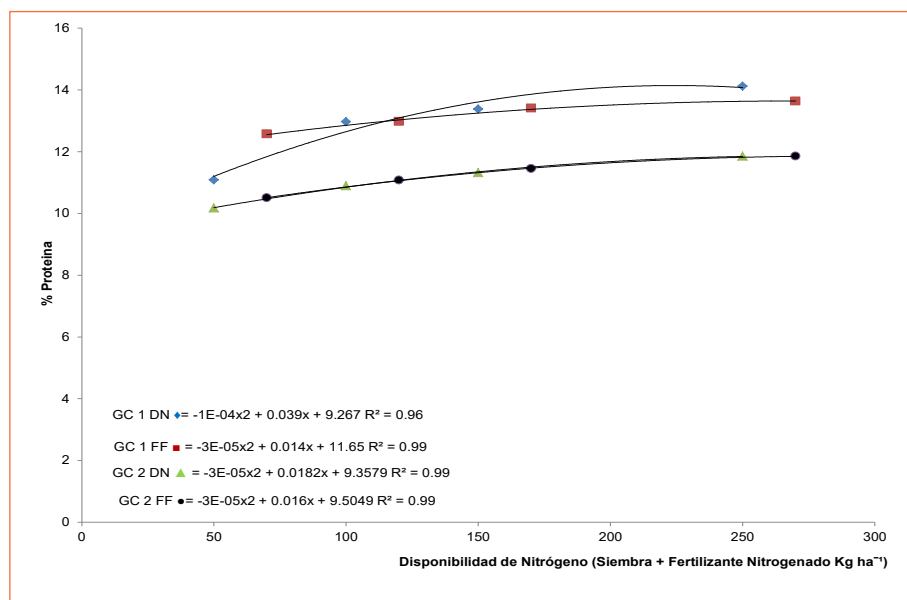
del momento de aplicación, en las fertilizaciones de mayores dosis: 4 (13,0%), 10 (12,8%) y 8 (12,7%) (Tabla 2), no presentando diferencias significativas entre ellos.

Se observó que las aplicaciones de fertilizante foliar en antesis permitieron aumentar el contenido de proteínas entre 1,4% y 1,6% por cada 100 kg N disponible en el suelo para ambos GC (Figura 2), sin embargo, estos incrementos fueron de menor magnitud a cuando la fertilización se hace en macollaje, coincidiendo con lo establecido por Castellarín et al. (op. cit.) y Quatrocchio et al. (2004) en que las aplicaciones foliares son menos efectivas para aumentar el contenido de nitrógeno cuando ya se fertilizo con anterioridad.

El peso hectolítico de ACA 360 del año 2 fue el menor valor encontrado (73,6) y se diferenció estadísticamente del resto (Tabla 2). En cuanto a los tratamientos no presento diferencias estadísticamente significativas entre ellos (Tabla 2).

### **Conclusiones**

- Independientemente del año, los máximos rendimientos se lograron con la variedad Klein Serpiente (GC 2), en los tratamientos de máxima dosis de fertilización y con el agregado de la aplicación foliar.



**Figura 2.** Porcentaje de proteínas en función de la disponibilidad de Nitrógeno a la siembra más fertilizante nitrogenado. Rendimientos promedio para cada nivel de N en ambos GC.

- Respecto al contenido de proteínas y de gluten húmedo, el mayor incremento se logró con la variedad ACA 360 perteneciente al GC 1, con el tratamiento de máxima dosis de fertilización en macollaje.
- El peso hectolitrico no presento diferencias significativas en los distintos tratamientos de fertilizantes y momentos de aplicación.
- En cuanto al momento de aplicación para rendimiento y el contenido de proteínas en grano, no se observaron diferencias significativas entre aplicar la dosis máxima en macollaje, o fraccionarla entre macollaje y encañazon, o con el agregado de la fertilización foliar.

## Bibliografía

- Austin, R., Bingham J., Blackwell, L., Evans, M., Ford, M., Morgan, C., and Taylor M. 1980. Genetic Improvement in winter wheat yield since 1900 associated physiological changes. *Journal Agriculture Science Camb.*, 94: 675 – 689.
- Castellarín J., Papa J., Pedrol H. y Vernizzi A. 1996. Fertilización foliar nitrogenada en el cultivo de trigo. Campaña 1995/96. Informe para extensión Nº 90 de la EEA INTA Oliveros.
- Di Rienzo J., Casanoves F., Balzarini M., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Fraschina, J. 2017. Capítulo 5: ¿Por qué es importante la calidad del trigo? Manual del Cultivo de Trigo. Editores Divito, G. y García, F. 1a ed. International Plant Nutrition Institute, 2017. Págs. 57-66. [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs/nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/9f61f86f928f631e0325830e006c3082/\\$FILE/Manual%20de%20Trigo%20Cap%205.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs/nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/9f61f86f928f631e0325830e006c3082/$FILE/Manual%20de%20Trigo%20Cap%205.pdf)
- García F. y Reussi Calvo N. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización de los cultivos /Editores Echeverría H. y García F. O. 904 pág. Cap. 14 Trigo.
- Howard, D., Newman, M., Essington, M. y Percell, W. 2002. Nitrogen fertilization of consevationtilled wheat II. Timing of nitrogen application of two nitrogen sources. *J. Plant. Nutr.* 25: 1329-1339.
- Manlla, A., Castellarín, J., Magnano, L. 2017. Trigo Pan: rendimiento y calidad comercial e industrial en SE de la provincia de Santa Fe

(Subregión triguera II N). Campaña 2016/17.

Quatrocchio, A.; Echeverría, H y Alonso, S. 2004. Estrategias de fertilización nitrogenada en cultivos de trigo: Calidad panadera. Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 19. Paraná. 22 – 25 de Junio 2004. AACs, Paraná, Entre Ríos, Argentina. ◀



# ¿Cuál es el mejor criterio para delinear zonas de manejo de nitrógeno para maíz en el noroeste bonaerense?

Paula Girón<sup>1</sup>, Agustín Pagani<sup>2</sup> y Flavio Gutiérrez Boem<sup>3</sup>

<sup>1</sup>EEA INTA General Villegas, <sup>2</sup>Clarion, <sup>3</sup>FAUBA  
giron.paula@inta.gob.ar

## Introducción

El nitrógeno (N) es el nutriente esencial más importante para los cultivos, por su rol en los sistemas biológicos, la complejidad de su ciclo y su participación en los sistemas de producción (Havlin et al., 2005). La disponibilidad de N es uno de los factores edáficos que con mayor frecuencia restringe el rendimiento del cultivo de maíz. En el noroeste bonaerense (NOB), son abundantes los estudios regionales que muestran aumentos significativos en su producción debidos a la fertilización nitrogenada (Díaz-Zorita y Duarte 1997, Barraco y Díaz-Zorita, 2005). Sin embargo, los fertilizantes nitrogenados tienen una alta importancia relativa dentro del costo de producción, siendo necesario contar con herramientas que permitan determinar la dosis óptima económica de nitrógeno (DOEN), es decir, la cantidad de insumo (fertilizante nitrogenado) que maximiza la renta de este cultivo (Pagani et al., 2008). Por otra parte, la determinación de la DOEN tiene implicancias ambientales, ya que el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados puede afectar negativamente la calidad de los recursos agua y aire (Basso y Ritchie, 2005). Numerosos estudios han mostrado que la DOEN para el cultivo de maíz varía entre lotes y entre años (Mamo et al., 2003). A su vez, dentro de un mismo lote de producción, la DOEN puede no ser constante debido a la variabilidad espacial de las condiciones de los cultivos en crecimiento y de las propiedades del suelo (Pierce y Nowak, 1999).

Para abordar este problema, en los últimos años han surgido tecnologías capaces de contemplar la heterogeneidad de los lotes de producción. En este sentido, la agricultura de precisión permite implementar estrategias de manejo sitio-específicas que contemplan la variabilidad espacio-temporal de la producción agrícola (Pierce y Nowak, 1999). Uno de los enfoques propuestos para el manejo sitio-específico de N es el que se basa en la delimitación de zonas de manejo (ZM). Se define a ZM como una subregión dentro de un lote que expresa una combinación homogénea

de los factores limitantes de rendimiento para los cuales es apropiada una dosis única de un insumo específico (Doerge, 1999). El ajuste de la dosis de N por ZM tendría el potencial de incrementar la eficiencia de uso de N, maximizar el beneficio económico y de reducir el impacto ambiental (Anselín, 2004). En este sentido se han propuesto diferentes criterios para la delineación de ZM de N como mapas de rendimiento de años anteriores (Ferguson et al., 2003), topografía (Franzen et al., 2000), conductividad eléctrica aparente (CEa) (Lund et al., 1999), índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) (Basso, 2012) y tipo de suelo (Pautasso et al., 2010).

Algunos estudios han concluido que los principios generales del manejo sitio-específico son transferibles entre regiones, pero las estrategias de fertilización con dosis variable deben ser modeladas localmente porque las condiciones edáficas y climáticas son variables (Bongiovanni, 2002; Anselin, 2004). Por lo tanto, es relevante para el NOB contar con información de la variabilidad espacial a nivel intra-lote de la respuesta a N por parte del cultivo de maíz e identificar cuáles son las herramientas más apropiadas para caracterizarla, a fin de poder desarrollar estrategias para ajustar las necesidades de N. En la actualidad no son abundantes los trabajos que evalúan la variabilidad espacial de la respuesta a N y la DOEN para el cultivo de maíz en lotes de producción, utilizando tecnologías de agricultura de precisión.

El objetivo del trabajo es comparar criterios para delinear ZM de N como variables explicativas de la variabilidad espacial del rendimiento del cultivo, la respuesta a N y la DOEN para el cultivo de maíz a nivel intra-lote mediante el uso de tecnologías de agricultura de precisión.

## Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en las campañas 2015/16 y 2016/17 en 5 lotes de producción ubicados en el NOB que fueron seleccionados por

presentar características edáficas y topográficas típicas de la zona. Se realizaron dos ensayos en franja en la primera campaña (Sitio 1 y 2) y tres ensayos en la segunda (Sitio 3, 4 y 5). Se evaluaron 5 dosis de N (0, 30, 60, 120 y 240 kg N ha<sup>-1</sup>) bajo la forma de urea granulada (46-0-0) en todos los sitios. El diseño de los ensayos fue en bloques completos aleatorizados con 2 y 3 repeticiones según el sitio, utilizando una metodología similar a la usada por Pagani y Mallarino (2015) y Kyveryga et al. (2018). El ancho de la franja fue el ancho de trabajo de la fertilizadora (entre 10 y 28 m) dependiendo el sitio y el largo igual al largo del lote (entre 240 y 1240 m). En cada ensayo se intentó orientar las franjas de manera tal que cada bloque quedara lo más uniformemente representado por los patrones de variabilidad edáfica y topográfica del terreno. Cada franja fue dividida en segmentos de 20 m de longitud o celdas que se utilizaron como unidades mínimas de estudio para los análisis realizados. Todos los ensayos fueron sembrados, fertilizados y cosechados con la maquinaria normalmente utilizada en cada establecimiento.

Se evaluaron diferentes criterios para delinear ZM:

- 1- *Mapas de rendimientos de cultivos anteriores para definir zonas de productividad diferencial dentro de los sitios experimentales.* Cada lote fue normalizado dividiendo el rendimiento de cada celda por la celda de máximo rendimiento dentro del lote, de la misma forma de lo reportado por Kitchen et al. (2005). De esta manera se posibilitó la combinación de mapas de rendimiento de cultivos previos (cuyos valores absolutos de productividad no son comparables entre sí) para generar un mapa de productividad promedio o índice de productividad (IP).
- 2- *El índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivos previos.* Los NDVI fueron calculadas a partir de 10 años de imágenes satelitales Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI TIRS en cada uno de los sitios experimentales (Boettinger et al., 2008). Se utilizaron imágenes de NDVI de octubre cuando el cultivo fue trigo, cebada, centeno o vicia, diciembre y enero para maíz y febrero para soja. Cada imagen fue relativizada dividiendo el NDVI de cada celda por el de la celda de mayor NDVI dentro del lote, de la misma forma que lo reportado por Kitchen et al. (2005). Luego se promediaron los valores relativizados de cada imagen para

cada celda y se obtuvo un raster final promedio de cada sitio empleando el software ESRI® ArcGis v10.x (ESRI, 2015).

- 3- *CEa90* que es la medición in situ de la capacidad que tiene el suelo para conducir corriente eléctrica hasta 90 cm de profundidad (Doerge, 1999).
- 4- *Elevación del terreno con precisión subcentimétrica.* CEa90 y elevación se realizaron utilizando la rastra Veris 3100® y un GPS de alta precisión (Veris Technologies, Salina, KS, USA).
- 5- *La profundidad efectiva (PE) del suelo* a través de un esquema de muestreo en grilla sistemático desde 10 x 20 m a 28 x 20 m, según el sitio experimental, se realizó la determinación georreferenciada de la PE del suelo usando un muestreador manual y un GPS de alta precisión. La impedancia física encontrada normalmente en el NOB es un horizonte thapto de profundidad variable entre 30 y 90 cm de profundidad.

La información de rendimiento generada fue analizada a una escala espacial considerablemente inferior a la de las franjas completas con el objetivo de estudiar la variabilidad espacial de la respuesta a N dentro de cada sitio. Por esa razón, las franjas con los tratamientos de N se dividieron en segmentos de 20 m de longitud y se promediaron los puntos de rendimiento pertenecientes a cada transecta para cada dosis de N. Se calculó la DOEN a través del método de la derivada primera utilizando la relación de precios histórica N-grano de maíz de 10:1 (Pagani et al., 2008). Los mapas de rendimiento generados fueron procesados mediante el programa ArcGIS v10.2.2 (ESRI, 2015) para corregir y eliminar los valores de rendimiento defectuosos.

En cada sitio se realizó la interpolación de los valores de cada criterio de delineación de ZM con el procedimiento kriging ordinario (Oliver, 2010). Una vez obtenidos los mapas interpolados (rasters), estos fueron convertidos a puntos el que se utilizó para definir la ZM para cada criterio. Dependiendo de la variabilidad del sitio, se delimitaron dos o tres ZM según los diferentes criterios evaluados utilizando clasificación el método de la clasificación difusa fuzzy c-medias contenido en el programa "Management Zone Analyst" (MZA) (Fridgen et al., 2004).

Para el estudio de los parámetros de la curva respuesta a N, en cada zona de muestreo de suelo de cada sitio se generó un buffer con el software ESRI® ArcGis v10.x (ESRI, 2015). Un buffer

es un polígono circular de un radio determinado, en este trabajo varió de 20 a 40 m según el sitio, de manera tal que en el mismo estuviesen todas las dosis de N y una determinada cantidad de celdas con valores de rendimiento y valores de CEa, elevación, profundidad efectiva, NDVI e índice de productividad. Por lo tanto, los valores de los parámetros de la curva de respuesta a N: ordenada al origen o rendimiento testigo (sin el agregado de N), rendimiento a la DOEN, respuesta a N (diferencia entre el rendimiento a la DOEN y la ordenada al origen) y la DOEN, fueron los obtenidos de las curvas respuesta generadas en cada buffer de cada zona de muestreo.

Una vez obtenidas las ZM para cada sitio según cada criterio de delineación, se realizaron comparaciones de los modelos de las curvas para corroborar que las curvas de rendimiento sean significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Para ello se utilizó el software Table Curve 2D v5.01. Se ingresó el rendimiento y la dosis de N según la ZM delineada mediante el MZA, se seleccionó el modelo de la curva (cuadrática plateau (QP) o cuadrática (Q)) en función del mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Se comparó el modelo completo de todas las curvas obtenidas por el MZA (2 o 3 curvas) con el modelo reducido de 1 curva promedio de todo el sitio. Para ello se calculó la suma de cuadrados del error del modelo (SCE) completo y del modelo reducido, con los grados de libertad de cada una se obtuvo el cuadrado medio del error (CME) para cada modelo. Luego se calculó el estadístico F como el cociente entre el CME de la diferencia del modelo completo y modelo reducido y el CME del modelo completo. Ese valor de F correspondió a un p-valor de tabla. Si el valor p fue menor a 0.05 significa que las curvas son estadísticamente diferentes, por lo tanto, se optó con el modelo completo, y si el valor p fue mayor a 0.05 significa que las curvas son iguales y por lo tanto se optó por el modelo reducido de una curva. Finalmente, para la elección del mejor criterio de delineación de ZM se compararon los  $R^2$  y el criterio de información de Akaike (AIC). El  $R^2$  del modelo completo se calculó como la suma de cuadrado total (SCT) del modelo reducido dividido la SCE de la QP 1 y SCE de la QP 2 cuando el modelo final es el de más de una QP. Cuando la QP es única, el  $R^2$  se calculó como la SCT del modelo reducido dividido la SCE del mismo modelo. El AIC se calculó de la siguiente manera:

Donde N es el número de puntos totales, k es

el número de parámetros del modelo ajustado, SC es la suma de cuadrados de la distancia vertical de los puntos hasta la curva (Motulsky y Christopoulos, 2003).

Obtenido el mejor criterio para delinear ZM en cada sitio, el conjunto de sitios que coincidió en el criterio, fueron agrupados para los análisis posteriores. Se realizó un análisis relacionando los parámetros de la curva de respuesta a N con los valores de cada criterio de zonificación. Se ajustaron regresiones lineales y se consideró un nivel de significancia del 5%.

## Resultados y discusión

### Caracterización meteorológica de las campañas

Las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo para ambas campañas (octubre-marzo 2015/16: 769 mm y octubre-marzo 2016/17: 867 mm) fueron superiores respecto al promedio histórico de la zona (octubre-marzo: 665 mm). En el mes de octubre fueron un 25% (2015/16) y 148% (2016/17) superiores respecto al promedio histórico, mientras que, en el mes de noviembre, un 60% superior y un 9% menor en la primer y segunda campaña, respectivamente. En los meses estivales, las precipitaciones también se encontraron por encima de la media histórica, en promedio de ambas campañas en un 13%, 19% y 55% superior para los meses de diciembre, enero y febrero, respectivamente. Estas condiciones derivaron en altos rendimientos máximos en ambas campañas, pero a su vez en condiciones predisponentes para la pérdida de N del sistema.

### Análisis por zonas de manejo según el IP de cultivos anteriores

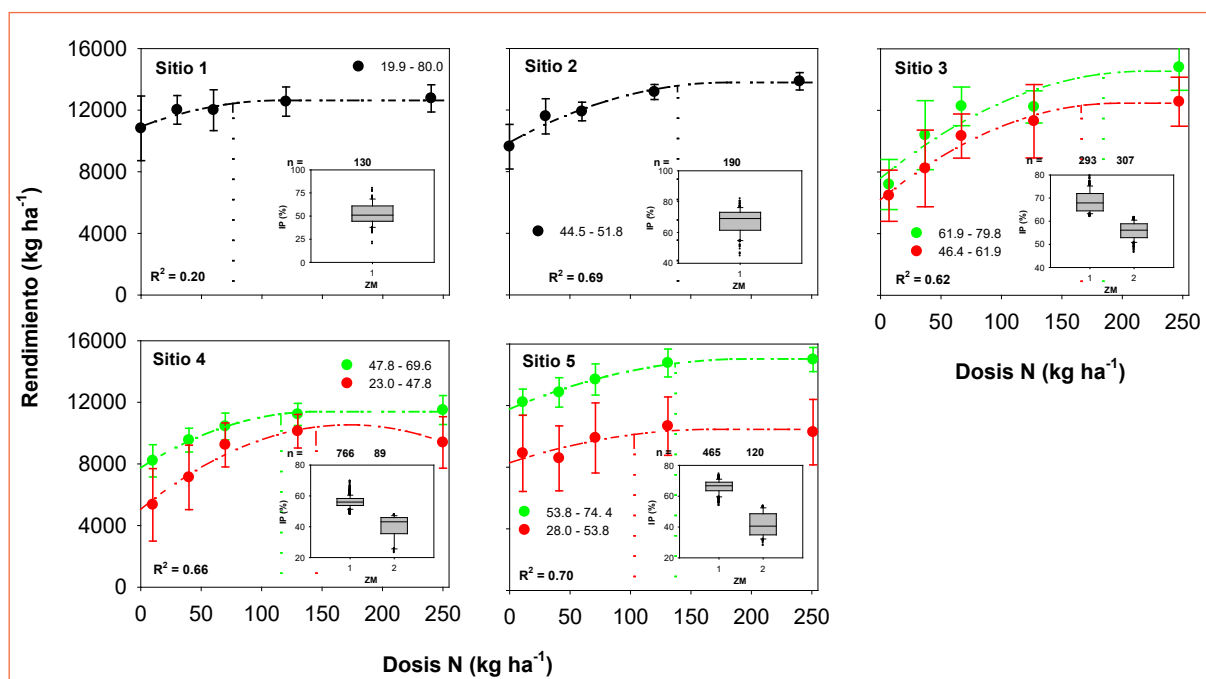
En tres de los cinco sitios, la delineación de ZM en función del IP de cultivos anteriores fue eficiente para separar curvas de respuesta a N estadísticamente diferentes (Figura 1). Los sectores dentro del lote con mayor productividad histórica (mayor IP), mantuvieron mayores niveles de rendimiento de maíz en las campañas evaluadas. Sin embargo, la respuesta a N y la DOEN se incrementaron a medida que lo hizo el IP en los Sitios 3 y 5 pero no así en el Sitio 4 donde menores valores de respuesta y DOEN fueron observadas en las zonas de mayor IP.

Wibawa et al. (1993) y Kravchenko y Bullock

(2000) reportaron dificultades para estimar los niveles de productividad dentro de las ZM debido a las variaciones en el patrón de las precipitaciones de un año a otro. Es concluyente que debido al efecto de los factores temporales que alteran los patrones espaciales de los mapas de rendimiento, se necesitan varios años para crear un número estable de ZM (Sudduth et al., 1997). Por otro lado, Sawyer (1994) señaló que el análisis promedio de mapas de rendimiento de un lote en años húmedos y secos tiende a neutralizar la información, por lo que sugiere generar diferentes mapas de productividad combinando años con similar pluviometría. A su vez, estudios relativamente recientes en regiones húmedas han señalado la falta de relación entre la DOEN y el rendimiento del cultivo de maíz (Arnall et al., 2013) por lo que es lógico que el IP no sea un buen indicador de la DOEN en campañas de abundantes precipitaciones.

### Análisis por zonas de manejo según NDVI de cultivos anteriores

Al igual que lo observado para el IP, en tres de los cinco sitios (Sitios 3, 4 y 5, **Figura 2**), la delineación de ZM en función del NDVI fue eficiente para separar curvas de respuesta a N estadísticamente diferentes. En dichos sitios, el rendimiento de maíz siempre fue mayor en las zonas que históricamente presentaron mayor NDVI. Sin embargo, el rendimiento a la DOEN fue proporcionalmente mayor en los Sitios 3 y 5 en las zonas de mayor NDVI que el rendimiento del tratamiento sin agregado de N, por lo tanto, la respuesta y la DOEN fue mayor en estas zonas. En cambio, en el Sitio 4, se observó mayor respuesta a la fertilización nitrogenada en zonas de bajo NDVI y, por ende, mayor DOEN. Basnyat et al. (2005) reportaron que en ZM de alto NDVI no se encontraron respuestas a aplicaciones de N y P sugiriendo que estas zonas en general se asocian con mayor disponibilidad de N y P edáficos.



**Figura 1.** Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicado para cada zona de manejo delineadas en base al índice de productividad (IP) basado en mapas de rendimiento de cultivos anteriores para los 5 sitios de estudio en el NOB en las campañas 2015/2016 y 2016/17. Los gráficos de caja internos representan la distribución del IP dentro de las clases generadas. El símbolo n hace referencia al número de celdas incluidas en cada clase de IP. Las líneas verticales indican la DOEN de cada ZM.



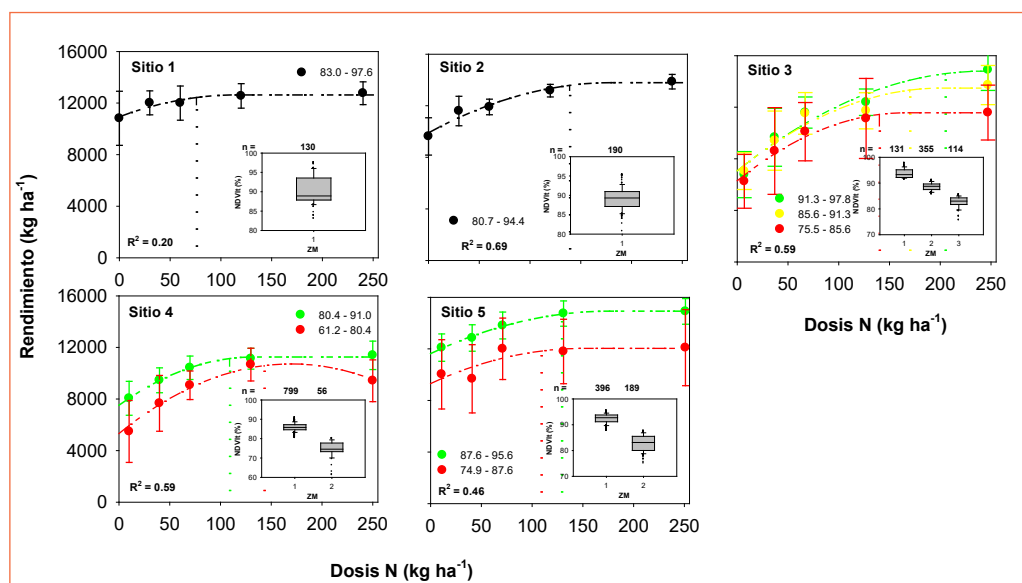
### Análisis por zonas de manejo según elevación

La elevación del terreno afectó el rendimiento del cultivo de manera variable dependiendo del sitio (**Figura 3**). En los Sitios 4 y 5, el rendimiento (en todo el rango de N evaluado) fue mayor en las zonas de menor elevación del terreno, en concordancia con lo reportado por Kravchenko y Bullock (2000). Resultados similares fueron obtenidos en el oeste de Iowa, por Spomer y Piest (1982) y se lo atribuyeron al mayor contenido de materia orgánica (MO), nutrientes y agua disponible en las zonas deprimidas. Sin embargo, lo anterior no se observó en los Sitios 1, 2 y 3 en donde los mayores rendimientos se observaron en las zonas más elevadas del paisaje. Este comportamiento probablemente se asocie a que las zonas más deprimidas de estos sitios están vinculadas a la presencia de impedancias físicas como horizontes thapto árgicos (datos no mostrados). Por las características de las campañas evaluadas, las zonas más deprimidas presentaron un mayor nivel de anegamiento en los Sitios 1, 2 y 3, por ello el rendimiento del cultivo se vio perjudicado en las zonas de menor elevación.

### Análisis por zonas de manejo según CEa90

La CEa del suelo es una de las variables más usadas para describir la variabilidad espacial de propiedades de suelo (Corwin y Lesch, 2003), ya que provee una medida indirecta de las propiedades físicas y las químicas (Rhoades et al., 1999) que tienen una influencia dominante en el crecimiento y rendimiento de las plantas (Kitchen et al., 2003). Trabajos del medio oeste de Estados Unidos mostraron que la CEa estuvo altamente relacionada con el espesor del suelo superficial como la profundidad del horizonte Bt (Sudduth et al., 2001).

En los Sitios 1, 2 y 3, las zonas con mayor CEa90 presentaron menores rendimientos, posiblemente asociados a la presencia de horizontes thapto característicos de esta zona, donde la infiltración del exceso de agua se ve perjudicada. En estas zonas de mayor CEa90, se observaron menores rendimientos del tratamiento testigo que en las zonas de mayor CEa90 (**Figura 4**), lo que incrementó la respuesta a la fertilización nitrogenada y la DOEN. Contrariamente, en los Sitios 4 y 5, que no presentaron zonas con horizonte thapto, los mayores rendimientos fueron observados en las zonas con mayores valores de CEa90 al igual que lo reportado por Puntel y Pagani (2013).



**Figura 2.** Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicado para cada zona de manejo delineadas en base al índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI) promedio de cultivos anteriores para los 5 sitios de estudio en el NOB en las campañas 2015/2016 y 2016/17. Los gráficos de caja internos representan la distribución del NDVI dentro de las clases generadas. El símbolo n hace referencia al número de celdas incluidas en cada clase de NDVI. Las líneas verticales indican la DOEN de cada ZM.

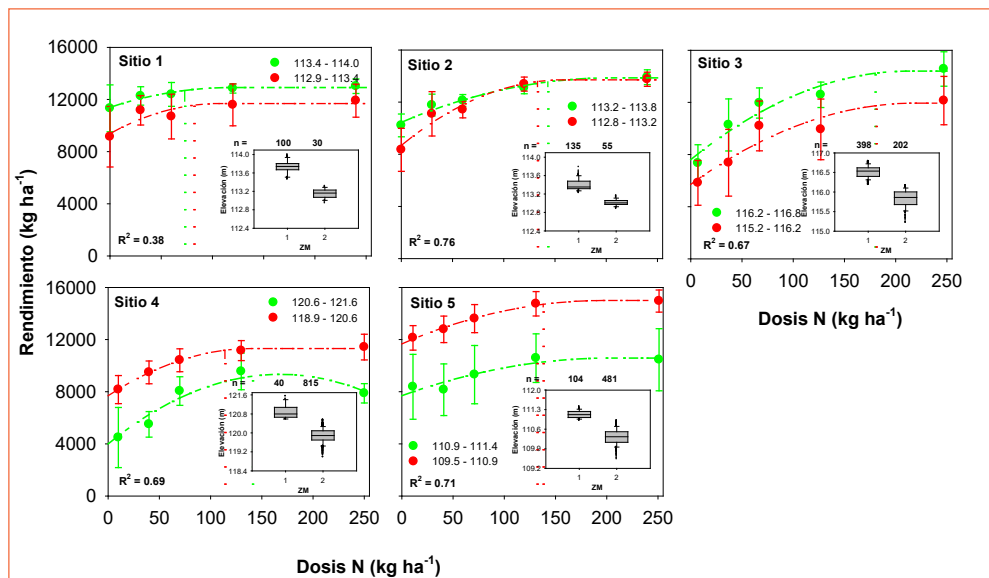


Figura 3. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicado para cada zona de manejo delineadas en base a la elevación del terreno para los 5 sitios de estudio en el NOB en las campañas 2015/2016 y 2016/17. Los gráficos de caja internos representan la distribución de la elevación dentro de las clases generadas. El símbolo n hace referencia al número de celdas incluidas en cada clase de elevación. Las líneas verticales indican la DOEN de cada ZM.

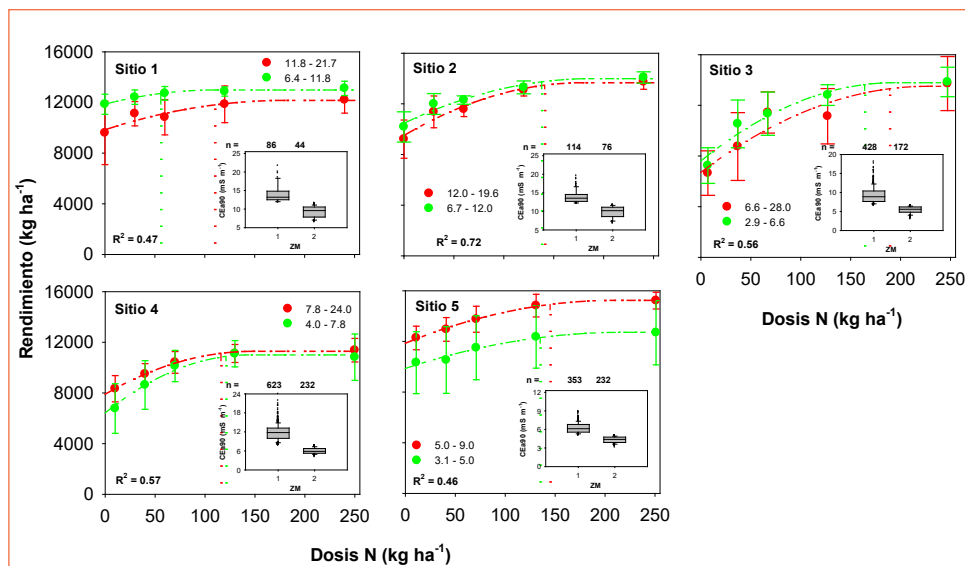


Figura 4. Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicado para cada zona de manejo delineadas en base a la conductividad eléctrica aparente (mS m<sup>-1</sup>) del suelo medida a 90 cm de profundidad (CEa90) para los 5 sitios de estudio en el NOB en las campañas 2015/2016 y 2016/17. Los gráficos de caja internos representan la distribución de la CEa90 dentro de las clases generadas. El símbolo n hace referencia al número de celdas incluidas en cada clase de CEa90. Las líneas verticales indican la DOEN de cada ZM.

### Análisis por zonas de manejo según profundidad efectiva del suelo

Solo los Sitios 1, 2 y 3 presentaron zonas con limitantes en la profundidad efectiva por lo que este análisis únicamente pudo realizarse para dichos sitios. En general, se observó que las zonas con thapto presentaron menores rendimientos que las áreas de los lotes sin limitantes de profundidad, independientemente del nivel de N aplicado (Figura 5). Sin embargo, la penalidad del rendimiento del testigo sin N fue proporcionalmente mayor que el rendimiento a la DOEN en las zonas con thapto. Esto derivó en mayores niveles de respuesta a la fertilización y mayor DOEN (principalmente en los Sitios 1 y 3 en las zonas someras de los lotes confirmando la tendencia observada para elevación y CEa).

### Relación entre los parámetros de la curva respuesta de N y elevación

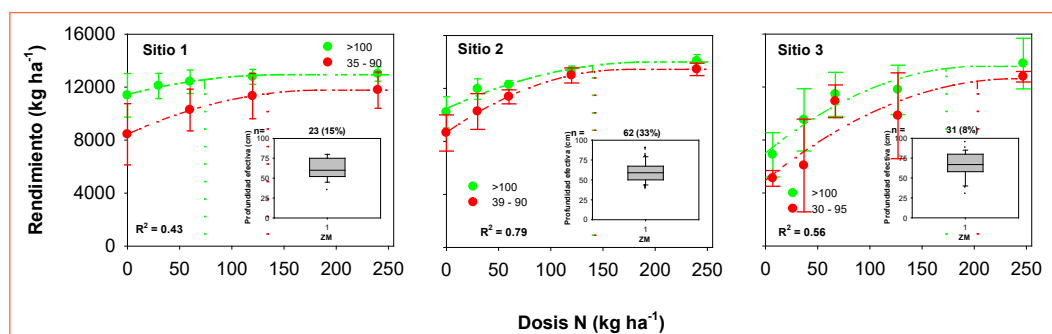
Agrupando los Sitios 3, 4 y 5, que fueron los de mayor heterogeneidad topográfica, se observó que el rendimiento del tratamiento testigo tendió a disminuir a medida que aumentó la elevación dentro del sitio (Figura 6). Este resultado puede explicarse por una menor oferta de N edáfico debido al alto contenido de arena y bajo contenido de MO de las áreas de mayor elevación de estos sitios. Diferencias de elevación > 1 m mostraron en promedio 74.6% de arena y 13.9 g kg<sup>-1</sup> de MO en el estrato 0-20 cm de profundidad, mientras que en las zonas más deprimidas (<0.5 m de diferencia de elevación) el contenido de arena disminuyó a 64.1% en promedio y la MO aumentó a 19.3 g kg<sup>-1</sup> (datos no mostrados). Las

zonas más bajas dentro del lote se comportaron como escenarios relativamente más favorables para el crecimiento del maíz sin N, evidenciando mejores condiciones de mineralización de N del suelo y de absorción de este nutriente por el cultivo en concordancia con lo reportado por Jaynes et al. (2011). El rendimiento a la DOEN presentó la misma tendencia que en el rendimiento del testigo (probablemente asociada a otras limitantes además de la disponibilidad de N), por lo que la respuesta a N y la DOEN no fueron afectadas consistentemente por la elevación del terreno (en general fueron altas y generalizadas en toda la superficie de los lotes). Esta situación es típica de campañas con abundantes precipitaciones como las registradas durante este estudio, donde la disponibilidad hídrica deja de ser el factor más limitante del rendimiento del cultivo.

### Relación entre los parámetros de la curva respuesta de N y CEa90

Trabajos previos (Fleming et al., 2000; Kitchen et al., 2005) informaron que áreas con alta CEa generalmente se asocian con altos contenidos de arcilla. Otros trabajos han obtenido buenas asociaciones entre la CEa y la profundidad del horizonte claypan (Kitchen et al 1999; Sudduth et al., 2001). En línea con estos resultados, en el presente estudio se observó una relación significativa entre el contenido de arcilla a 20-80 cm y la CEa90 cm (Figura 7) cuando se consideraron los sitios con al menos 10% de su superficie con horizonte thapto detectable por lo que la CEa90 fue empleado como un indicador de alta resolución espacial de la PE del suelo.

Cuando los Sitios 1 y 2 fueron analizados con-



**Figura 5.** Rendimiento de maíz en función de la dosis de nitrógeno (N) aplicado para cada zona de manejo delineadas en base a la profundidad efectiva (PE) del suelo (cm) para 3 sitios de estudio en el NOB en las campañas 2015/2016 y 2016/17. Los gráficos de caja internos representan la distribución de la PE del suelo. El símbolo n hace referencia al número de celdas incluidas en cada clase de PE del suelo.

juntamente, se observó que el rendimiento del testigo disminuyó significativamente a medida que aumentó la CEa90, evidenciando menor disponibilidad de N asociada a un mayor nivel de pérdidas por lavado y desnitrificación en las áreas más arcillosas (con presencia de thapto) que permanecieron anegadas por más tiempo (Figura 8). Debido a que el rendimiento a la DOEN no fue afectado por la CEa90, se observó que la respuesta a N y la DOEN aumentaron a medida que lo hizo la CEa90. Estos resultados sugieren que la principal limitante para el crecimiento del cultivo en las zonas de alta CEa con presencia de horizonte thapto fue la disponibilidad de N. Lo anterior se encuentra estrechamente asociado a las características de ambas campañas ya que se espera un comportamiento diferente en condiciones de estrés hídrico donde el rendimiento máximo puede verse más perjudicado que el rendimiento sin N en las zonas someras debido a su menor capacidad para almacenar agua.

## Conclusiones

En los sitios topográficamente más heterogéneos (rango de elevación mayor a 1 m, Sitios 3, 4 y 5), la elevación del terreno fue el criterio más efectivo para separar áreas dentro de los lotes con rendimiento contrastante. Sin embargo, la

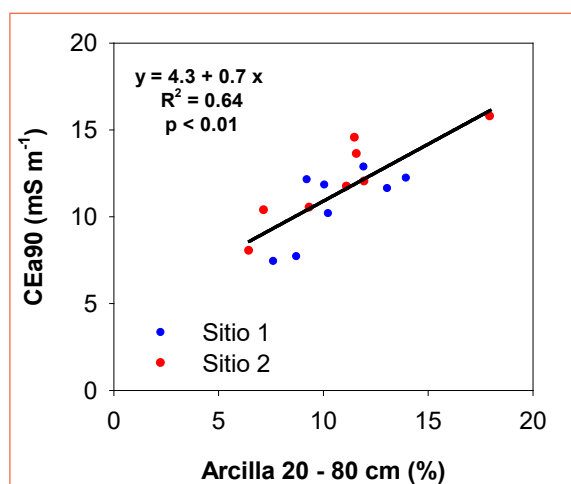


Figura 7. Relación entre la CEa90 y el contenido de arcilla promedio de las profundidades 20-40, 40-60 y 60-80 cm para los Sitios 1 y 2.

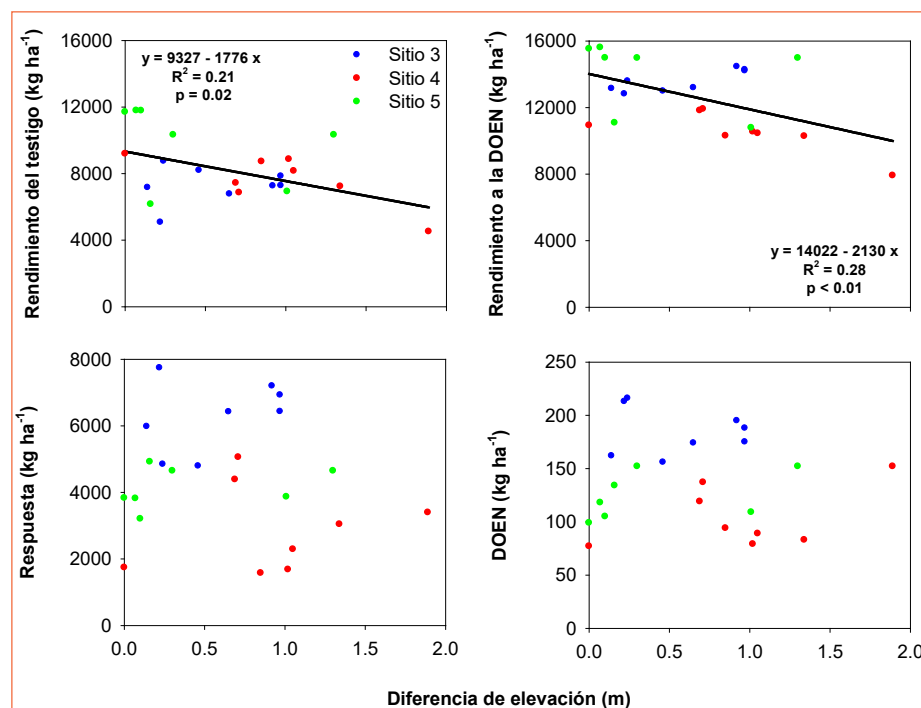


Figura 6. Rendimiento del testigo sin nitrógeno, rendimiento a la dosis óptima económica (DOEN), respuesta y DOEN en función de la diferencia de elevación expresada en metros (m) para los Sitios 3, 4 y 5.



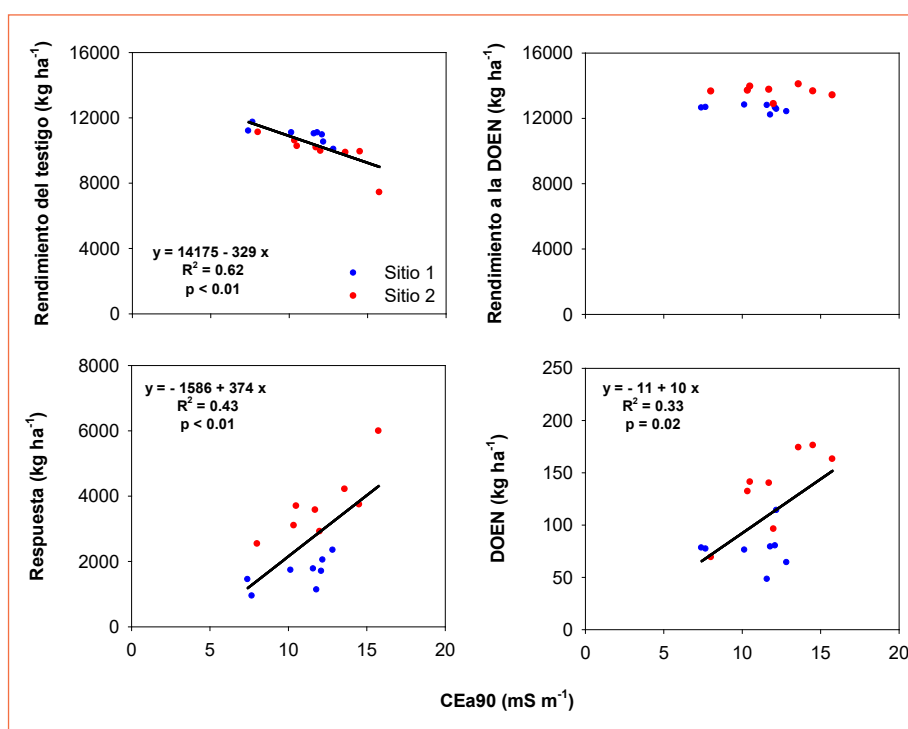
elevación no fue efectiva para separar zonas con respuesta a N o DOEN diferenciales, ya que ambas fueron altas y generalizadas dentro de los lotes, situación típica de campañas con abundantes precipitaciones.

En los sitios donde se observaron limitantes en la profundidad efectiva en más de un 10% del lote (Sitios 1 y 2), el mejor criterio para delinear ZM fue la CEa90. En estos sitios la respuesta a la fertilización nitrogenada y la DOEN aumentaron a medida que lo hizo la CEa90, probablemente asociada a la mayor magnitud de pérdida de N en las zonas de alta CEa90, que permanecieron encharcadas por más tiempo.

Si bien la información generada se considera de utilidad para el NOB como base para entender la variabilidad espacial de la respuesta a N en el cultivo de maíz, se encuentra estrechamente condicionada a las características de las campañas evaluadas por lo que más investigación es necesaria para un mejor entendimiento de las múltiples interacciones espacio-temporales que afectan la respuesta a la fertilización nitrogenada.

## Bibliografía

- Anselin, L.; Bongiovanni, R.; Lowenberg-DeBoer, J. 2004. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management and corn production. *Am. J. Agr. Econ.* 86 (3): 675-687.
- Arnall, D. B. A. P. Mallarino, M. D. Ruark, G. E. Varvel, J. B. Solie, M. L. Stone, J. L. Mullock, R. K. Taylor y W. R. Raun. 2013. Relationship between grain crop yield potential and nitrogen response. *Agron. J.* 105:1335-1344.
- Barraco, M.; Diaz-Zorita, M. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en hapludoles típicos. *Ciencia del suelo* 23 (2) 197-203.
- Basso, B.; Ritchie, J.T. 2005. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan. *Agr. Ecosyst. Environ.* 108: 241-329.
- Basnyat, P., McConkey, B. G., Selles, F., Meinert, L. B. 2005. Effectiveness of using vegetation index to delineate zones of different soil and crop grain production characteristics. *Can. J. Soil Sci.* 85: 319-328.
- Boettinger J., Ramsey R., Bodily J., Cole N., Kienast-Brown S., Nield S., Saunders A., Stum



**Figura 8.** Rendimiento del testigo sin nitrógeno, rendimiento a la dosis óptima económica (DOEN), respuesta y DOEN en función al contenido de la conductividad eléctrica aparente de 0 a 90 cm de profundidad (CEa90) para los Sitios 1 y 2.

- A. 2008. Landsat spectral data for digital soil mapping. En: Digital Soil Mapping with limited data, Springer. 193-202 p.
- Bongiovanni R., Lowenberg-DeBoer J. 2002. Economics of nitrogen response variability over space and time: Results from the 1999-2001 field trials in Argentina, Trabajo presentado en: 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management.
- Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agron. J.* 95:455-471.
- Díaz- Zorita, M.; Duarte, G.A. 1997. Fertilización nitrogenada de maíz en el oeste bonaerense. EN: AIANBA. Maíz. VI Congreso Nacional: Compendio de trabajos. Pergamino: AIANBA. Tomo II, pp. 144-149.
- Doerge, T.A. 1999. Management Zone Concepts. S.I: Potash & Phosphate Institute. Site-Specific Management Guidelines 2, 4 p.
- ESRI. 2015 ArcGIS. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/>
- Ferguson, R.B.; Lark, R.M.; Slater, G.P. 2003. Approaches to management zone definition for use of nitrification inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 937-947.
- Fleming, K.L., Westfall, D.G., Wiens, D.W., Brodahl, M.C., 2000. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precis. Agric.* 2, 201-215.
- Franzen D. W., A. D. Halvorson and V. L. Hoffman. 2000. Management zones for soil N and P levels in the Northern Great Plains. EN: PC et al. (Ed.) *Proc. Int. Conf. on Prec. Agric.* 5th Bloomington MN. 16-19 Julio 2000. ASA, CSSA, SSSA. Madison WI.
- Fridgen J.J., Kitchen N.R., Sudduth K.A., Drummond S.T., Wiebold W.J., Fraisse C.W. 2004. Management zone analyst (MZA). *Agron J.* 96:100-108.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, y W.L. Nelson. 2005. Soil fertility and fertilizers. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. p. 515.
- Jaynes D.B.; Kaspar T.C.; Colvin, T.S. 2011. Economically Optimal Nitrogen Rates of Corn: Management Zones Delineated from Soil and Terrain Attributes. *Agron. J.* 103: 1026-1035.
- Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., 1999. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *J. Prod. Agric.* 12, 607-617.
- Kitchen N.R., Drummond S.T., Lund E.D., Sudduth K.A., Buchleiter G.W. 2003. Soil Electrical Conductivity And Topography Related To Yield For Three Contrasting Soil-crop Systems. *Agron. J.* 95:483-495.
- Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Myers D.B; Drummond, S.T.; Hong, S.Y. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 285-308.
- Kravchenko A.N., Bullock D.G. 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agron J.* 92:75-83.
- Lund, D.L.; Colin, P.E.; Christy, D.; Drummond, P.E. 1999. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. EN: Robert, P.C.; Rust, R.H.; Larson, W.E.(Ed). *Precision Agriculture*. Madison: ASA-CSSA-SSSA. pp.1089-1100.
- Mamo, M.; Malzer, G.L.; Mulla, D.J.; Huggins, D.R.; Strock, J. 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95: 958-964.
- Oliver M.A. 2010. Geostatistical Applications for Precision Agriculture. Springer, United Kingdom. 337 pp.
- Pagani, A.; Echeverría, H.E.; Sainz Rozas H.R.; Barbieri, P.A. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 26(2): 183-193.
- Pautasso, J.M.; Albarenque, S.; Schulz, G.; Kemmerer, A.; Bedendo, D.; Melchiori, R. 2010. Delimitación de zonas de manejo mediante variables de suelo y validación para maíz. EN: INTA, EEA Manfredi. 9º Curso internacional de Agricultura de precisión, 4º Expo de maquinarias precisas, 2º Gira tecnológica de precisión. Manfredi: Ediciones INTA. pp.207-214.
- Pierce, F.J.; Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. EN: Spark, D. (Ed) *Advances in Agronomy*. San Diego: Academic Press. 67: 1-85.
- Puntel L., Pagani A. 2013. Site-specific analysis of maize yield response to nitrogen in Argentina. ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings Madison, Wis:1 p.
- Rhoades, J.D., Corwin, D.L., Lesch, S.M., 1999. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: Corwin, D.L. (Ed.), *Assessment of Non-Point Source Pollution in the Vadose Zone*. Geophysical Monograph 108. American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 197-215.
- Spomer, R.G.; Piest, R.F. 1982. Soil productivity and erosion of Iowa loess soils. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 25, 1295-1299. 1982.
- Sudduth K., Drummond S., Birrell S., Kitchen N. 1997. Spatial modeling of crop yield using soil and topographic data. *Precis Agric.* 97.
- Sudduth K., Drummond S., Kitchen N. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Comput Electron Agric.* 31:239-264.
- Wibawa W.D., Dlodlu D.L., Swenson L.J., Hopkins D.G., Dahnke W.C. 1993. Variable fertilizer application based on yield goal, soil fertility, and soil map unit. *J. Prod. Agric.* 6:255-261. ◀

# Efecto residual en maíz de la inoculación en arveja y vicia

Juan Martín Enrico y Fernando Salvagioti  
EEA INTA Oliveros, Santa Fe  
enrico.juan@inta.gob.ar

## Introducción

El cultivo de soja (*Glycine max* L) es el principal cultivo de verano en los sistemas agrícolas de la región pampeana, principalmente como monocultivo con largos períodos de barbecho desnudo (Caviglia & Andrade, 2010). El bajo aporte de residuos y escasa cobertura bajo este monocultivo pone en riesgo la sustentabilidad de los sistemas (Wright & Hons, 2004), por lo que se recomienda la inclusión de cereales que aportan mayores volúmenes de residuos, especialmente trigo y maíz. En los últimos años, las fechas de siembra tardía del maíz se adoptaron en la región pampeana de Argentina, principalmente después de la soja de la temporada anterior (Maltese et al., 2019), dejando un período de ca. ocho meses con un barbecho desnudo. Este período sin cultivos puede ser sembrado con cultivos de grano o cultivos de cobertura (CC) y hacer un uso más eficiente de los recursos. Cuando se incluyen leguminosas como CC o grano, además de un aumento de la biodiversidad, existe una importante contribución del nitrógeno (N) a través de la fijación biológica de nitrógeno (FBN) (Frasier et al., 2016). La inclusión de leguminosas en la rotación puede mejorar la capacidad de suministro de N del suelo para cultivos no leguminosos en las secuencias, pero esta contribución depende de la especie de leguminosas (Büchi et al., 2015), la interacción leguminosa-rizobio, el nivel de producción de leguminosas (Collino et al., 2015) y el objetivo por el cual se sembró la leguminosa, es decir, CC o producción de grano (Rochester y Peoples, 2005). Además, la cantidad de N derivada de la leguminosa al cultivo posterior depende del momento en que se seca un cultivo de cobertura de leguminosas y del contenido relativo de celulosa, hemicelulosa y lignina (Waggoner, 1989).

La arveja para grano (*Pisum sativum* L.) y la vicia (*Vicia sativa* L. o *Vicia villosa* Roth) son opciones en los sistemas donde se incluye al maíz tardío en la secuencia para aumentar la ocupación

del suelo y la capacidad de suministro de N en el sistema. Se espera una mayor contribución de N en la vicia que en arveja ya que todo el N permanece en el sistema en el primer caso, mientras que en el segundo caso solo una parte de N queda en el sistema ya que una proporción de este nutriente se exporta con grano.

La inoculación de las leguminosas es una práctica que ha tenido éxito en distintas partes del mundo (Mendes et al., 2003). Esta práctica adquiere mayor importancia cuando el suelo no ha sido cultivado previamente con la leguminosa o cuando los cultivos no se realizan anualmente y, en consecuencia, las poblaciones de los rizobios específicos son bajas (Toresani et al., 2013). Vicia y arveja se asocian específicamente con *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* y se ha informado la respuesta a la inoculación (McKenzie et al., 2001), sin embargo, no hay reportes que muestren el efecto relativo de la inoculación de leguminosas en el cultivo posterior. Dado que la inoculación puede mejorar la nutrición de N de leguminosas, entonces también el manejo de la inoculación podría afectar la disponibilidad de N en el cultivo posterior como ya fuera observado cuando el maíz tiene diferentes cultivos antecesores (Salvagioti et al., 2012, 2014; Omae & Nagumo, 2016).

El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la inoculación previa en vicia y arveja sobre la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz de segunda.

## Materiales y métodos

### Generalidades y diseño de los experimentos

Se realizaron dos experimentos en la EEA Oliveros durante las campañas 2012-13 y 2013-14 en vicia y arveja en un suelo Argiudol típico con más de 40 años de agricultura y sin historia de arveja o vicia previa. Los tratamientos consistieron en el tratamiento de la semilla de ambas especies con (+Inoc) y sin (-Inoc) la inoculación con *Rhizobium*

***leguminosarum bv viciae*** Cepa D 70. Se utilizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con cuatro repeticiones donde cada parcela tuvo una superficie de 147,5 m<sup>2</sup>. Posterior al secado de la vicia y cosecha de arveja se realizó un barbecho químico y se sembró maíz a 0.52 m entre hileras. Las fechas de siembra fueron el 26 de diciembre de 2012 (hibrido KWS 3601 MG RR2) y 13 de diciembre de 2013 (hibrido ARV 2194 HX RR). Se evaluaron 5 niveles de N (0, 30, 60, 120 y 180 kg N ha<sup>-1</sup>) en cada una de las combinaciones cultivo antecesor x tratamiento inoculación de las leguminosas invernales. Los tratamientos se arreglaron en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se utilizó como fuente nitrogenada urea+NBPT. A madurez de cosecha se determinó el rendimiento en una superficie de 5 m<sup>2</sup> y se corrigió el rendimiento a 0.14 kg H<sub>2</sub>O kg grano<sup>-1</sup>.

### **Determinaciones realizadas en cultivos invernales**

En llenado de granos avanzado del cultivo de arveja, aproximadamente 10-12 días antes de madurez fisiológica y entre plena floración y/o inicios de llenado de granos en vicia se determinó materia seca aérea (MST) sobre una superficie de 0.5 m<sup>2</sup>. Las muestras fueron secadas en una estufa de aire forzado a 65°C durante 72 h. En el caso de la arveja, se separaron las estructuras vegetativas del grano. Luego de pesadas, las muestras fueron molidas utilizando un molino Wiley, y posteriormente enviadas al laboratorio para analizar la concentración de N (%Nt) a través del método Kjeldahl (Nelson & Sommers, 1973). La cantidad de N total absorbido (N<sub>abs</sub>) se calculó como el producto de %Nt y la materia seca de cada estructura. Se determinó la proporción de fijación biológica de N (%Nd<sub>fa</sub>) utilizando el método de abundancia natural de 15N (Shearer & Kohl 1986). Se utilizó trigo en cada parcela como planta de referencia (no fijadora de N) para la estimación de la FBN. La cantidad de N derivado de la FBN (N<sub>FBN</sub>) se estimó multiplicando %Nd<sub>fa</sub> y N<sub>abs</sub>. En arveja se determinó el rendimiento de semilla (Rto) y se ajustó a un contenido de humedad estándar de 0.14 kg H<sub>2</sub>O kg grano<sup>-1</sup>.

### **Análisis de la información**

Para el análisis de la respuesta de vicia y arveja a la inoculación se utilizó un modelo mixto donde

el tratamiento de inoculación (Inoc) se consideró efecto fijo y el Año (A) y la interacción Inoc x A como efecto aleatorio. Se realizó un Análisis de la Varianza (ANAVA) utilizando el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2017). El método de comparación para detectar diferencias significativas entre los tratamientos fue LSD Fisher, con nivel de significación  $\leq 0.10$ .

Para el análisis del rendimiento de maíz a través de un modelo mixto, considerando la dosis de fertilizante nitrogenado (N), cultivo antecesor (Ant) e inoculación (Inoc) del cultivo antecesor como factores fijos, mientras que las repeticiones y los años fueron considerados efectos aleatorios. Cuando se observó interacción entre factores se separaron los efectos utilizando el test de secciones de efecto (slice test en SAS, Littell et al., 1996) para analizar las diferencias dentro de cada interacción. Cuando se encontraron efectos significativos de la fertilización nitrogenada, se ajustó la curva de respuesta con un modelo cuadrático *plateau* con tres parámetros:

$$\begin{aligned} \text{Rendimiento} &= a + b \cdot x + c \cdot x^2 \text{ si } x < U, \\ \text{Rendimiento} &= \text{plateau} \text{ si } x > U, \end{aligned} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde, a = ordenada al origen, que representa el rendimiento cuando el cultivo no recibió fertilización nitrogenada, b = pendiente lineal, c = curvatura. El *plateau* se estimó según la igualdad: i)  $\text{plateau} = a + b \cdot U + c \cdot U^2$ , donde U representa el umbral, según la igualdad  $U = -b / (2 \cdot c)$ . El valor U también se estimó como parámetro reemplazando a "c" por la igualdad " $c = -b / (2 \cdot U)$ " como tercer parámetro. Los parámetros de las funciones de los distintos tratamientos fueron comparados a través de un test t. Se estimó la derivada primera de cada modelo para estimar la dosis óptima económica (DOE) usando una relación de precios grano:N de 10:1 (Salvagiotti et al., 2011). Se calculó la eficiencia agronómica a la dosis óptima económica ( $EA_{DOE} = \Delta \text{ kg grano kg N fertilizante}^{-1}$ ) y productividad parcial del factor ( $PPF_{DOE} = \text{kg grano kg N fertilizante}^{-1}$ ).

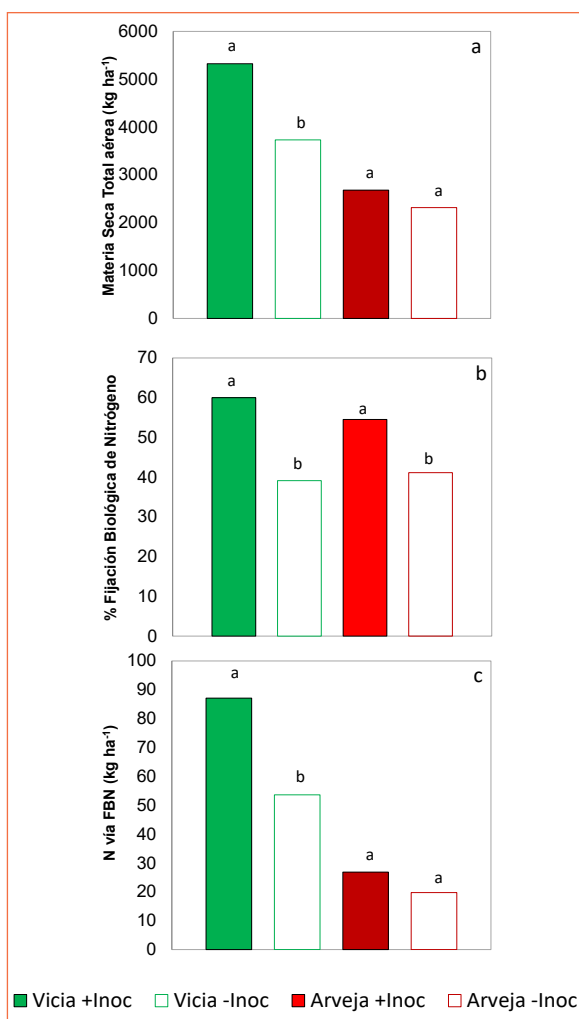
## **Resultados**

### **Respuesta a la inoculación en vicia y arveja**

En promedio, la producción de MST en vicia fue de 4529 kg ha<sup>-1</sup>, incrementándose un 43% en respuesta a la inoculación ( $p < 0.01$ ). En arveja, la producción de MST aérea fue en promedio



2499 kg ha<sup>-1</sup>, no observándose respuesta a la inoculación (**Figura 1a**). El %Ndfa fue de 50% y 48% en vicia y arveja, respectivamente, detectándose incrementos significativos del 53% y 33% ( $p<0.01$ ) para vicia y arveja, respectivamente, en respuesta a la inoculación (**Figura 1b**). Al analizar el contenido de N\_FBN en términos de kg N por unidad de superficie (**Figura 1c**), en arveja se determinó un promedio de 23 kg, sin diferencias entre tratamientos, mientras que vicia derivó de la FBN en promedio 70 Kg con un incremento significativo en respuesta a la inoculación del 62% ( $p<0.01$ ).



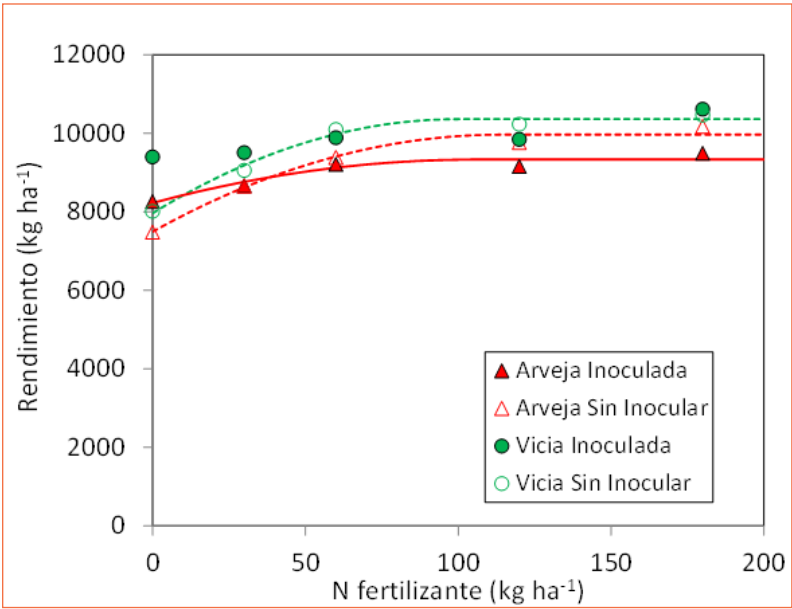
**Figura 1.** Producción de MST aérea (a), proporción de N derivado de fijación biológica (b) y el N absorbido vía FBN (c) en función del tratamiento de inoculación en vicia y arveja. Para cada especie, las letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre tratamientos. Cada columna es el promedio de dos años.

### Respuesta del cultivo de maíz de segunda a la fertilización nitrogenada sobre diferentes antecesores

El rendimiento promedio de maíz fue de 9366 kg ha<sup>-1</sup> y en promedio el rendimiento del maíz sobre vicia fue 8% superior al observado sobre arveja (**Tabla 2**). Se observó respuesta significativa a la aplicación de N que varió entre 1221 y 2570 kg ha<sup>-1</sup>, dependiendo de si el cultivo antecesor fue inoculado o no (interacción Inoculación antecesor x N significativa,  $P<0.01$ , **Tabla 1**). No se observaron incrementos significativos en el rendimiento ( $P>0.10$ ) cuando el maíz se sembró sobre un cultivo de vicia inoculada (**Figura 2**). Las mayores respuestas a la fertilización con N se observaron cuando ambos antecesores no fueron inoculados, con incrementos entre el testigo y la dosis máxima de N que varió entre 2450 y 2691 kg ha<sup>-1</sup> (30% y 35%, en términos relativos) para vicia y arveja, respectivamente. Por otra parte, cuando el antecesor fue arveja inoculada se observó una respuesta menor, del orden del 15%, a la fertilización con N ( $P=0.1$ ) representado ca. 1226 kg ha<sup>-1</sup>. En estos últimos tres tratamientos, entre el 92% y 99% de la variación observada fue explicada por un modelo cuadrático-plateau (**Tabla 2**). El parámetro "a" de esta función, que representa el rendimiento del cultivo sin fertilización, fue un 8% mayor cuando el cultivo antecesor fue vicia sin inocular y 6% cuando fue arveja inoculada en relación a arveja sin inoculación (**Tabla 2**). Sin embargo, el parámetro "b" de la relación que indica la fase lineal de respuesta fue similar entre ambos antecesores sin inocular, siendo 2.2 veces superior a la registrada cuando el cultivo antecesor fue arveja inoculada (**Tabla 2**). El parámetro "c" no fue afectado por los cultivos antecesores. En consecuencia, la dosis óptima económica fue un 50% superior cuando ambos cultivos, arveja y vicia, no fueron inoculados previamente en relación a la arveja inoculada. La eficiencia agronómica para esta relación de precios en el primer caso fue de 28.7 kg de grano por kg de fertilizante N agregado, un 86% superior a la estimada para arveja inoculada (**Tabla 2**).

**Tabla 1.** Análisis de la varianza para rendimiento de maíz según distintas dosis de fertilizante nitrogenado (N) cultivo antecesor (arveja y vicia, Ant) con y sin la aplicación de inoculantes en estos antecesores (InocAnt).

		Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	
		Antecesor No inoculado	Antecesor Inoculado
N	0	7746	8829
	30	8856	9084
	60	9738	9546
	120	9995	9499
	180	10316	10050
InocAnt	No Inoculado	9330	
	Inoculado	9402	
Ant	Arveja	9023	
	Vicia	9709	
Fuente de variación		Probabilidad test F	
N		< 0.01	
Ant		< 0.01	
InocAnt		0.65	
Ant x N		0.98	
Ant x InocAnt		0.19	
InocAnt x N		0.01	
Antx InocAnt x N		0.92	



**Figura 2.** Relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado aplicado y el rendimiento en maíz sembrado sobre dos antecesores (arveja y vicia) con y sin la aplicación de inoculantes en estos antecesores. Las líneas indican el ajuste cuadrático-plataeu a los tratamientos en donde hubo efecto significativo de la fertilización nitrogenada. Los parámetros de las funciones se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de probabilidad de la interacción Antecesor x Inoculación del antecesor separado por el test de secciones de efecto, parámetros de la función cuadrática-plateau y dosis óptima económica para una relación de precios 10:1 (DOE, kg N ha<sup>-1</sup>), Rendimiento con la DOE (R<sub>DOE</sub>, kg ha<sup>-1</sup>), Eficiencia Agronómica en la DOE (EA<sub>DOE</sub>, Δ kg grano kg N fertilizante<sup>-1</sup>) y productividad parcial del factor en la DOE (PPF<sub>DOE</sub>, kg grano kg N fertilizante<sup>-1</sup>) en maíz sembrado sobre dos antecesores (arveja y vicia) con y sin la aplicación de inoculantes en estos antecesores.

Tratamiento	Parámetros									
	P value	a	b	c	r <sup>2</sup>	Umbral	DOE	R <sub>DOE</sub>	EA <sub>DOE</sub>	PPF <sub>DOE</sub>
Vicia inoculada	0.12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vicia sin inocular	<0.01	7964 a	47.9 a	-0.24 a	0.99	100	40	9114	28.8	228
Arveja inoculada	0.10	8225 a	20.9 b	-0.10 a	0.92	106	28	8655	15.4	309
Arveja sin inocular	<0.01	7495 b	43.3 a	-0.19 a	0.98	114	44	8665	26.6	197

## Conclusiones

La inoculación incrementó la biomasa aérea, el contenido de N y el % de N derivado de FBN en el cultivo de vicia, mientras que en arveja solo el %Ndfa. El %Ndfa fue de 55% y 60% para arveja y vicia inoculadas, respectivamente. El cultivo de maíz sembrado sobre vicia inoculada no respondió a la fertilización con N, y la mayor respuesta a la fertilización en maíz se observó cuando la arveja y la vicia no fueron inoculadas, pero también se observó respuesta a la fertilización con N, de menor magnitud, cuando la arveja fue inoculada. Estos resultados muestran la relevancia del manejo del N en el sistema de producción a través de la inoculación de las leguminosas invernales en suelos sin historia previa de vicia o arveja.

## Bibliografía

- Büchi, L; CA, Gebhard; F, Liebis; S, Sinaj; H, Ramseier & R, Charles. 2015. Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil*, 393:163–175.
- Caviglia, OP & FH, Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 3:001–008.
- Collino, DF; F, Salvagioti; A, Peticari; CF, Piccinetti; G, Ovando; S, Urquiaga & RW, Racca. 2015. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationship with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil* 392: 239-252.
- Di Rienzo J.A., F, Casanoves; MG, Balzarini; L, Gonzalez; M, Tablada & CW, Robledo. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Frasier, I; A, Quiroga & E, Noellemyer. 2016. Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems. *Sci. Total Environ.* 562(2):628-639.
- Littell, R.; R, Milliken; W, Stroup & R, Wolfinger. 1996. SAS System for MIXED Models. SAS Institute, Cary, NC.
- McKenzie, RH; AB, Middleton; ED, Solberg; J, DeMulder; N, Flore; GW, Clayton & E, Bremer. 2001. Response of pea to rhizobia inoculation and starter nitrogen in Alberta. *Canadian Journal of Plant Science* 81:637-643.
- Maltese, NE; RJM, Melchiori; GA, Maddonni; JM, Ferreyra & OP, Caviglia. 2019. Nitrogen economy of early and late-sown maize crops. *Field Crops Research* 231:40-50.
- Mendes, IC; M, Hungria & MAT, Vargas. 2003. Soybean response to starter nitrogen and *Bradyrhizobium* inoculation on a cerrado oxisol under no-tillage and conventional tillage systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27:81-87.
- Nelson, DW & LE, Sommers. 1973 Determination of total nitrogen in plant material. *Agron. J.* 65: 109-112.
- Omae, H & F, Nagumo. 2016. Effects of Oat (*Avena sativa*) and Hairy Vetch (*Vicia villosa*) Cover Crops on Nitrate Leaching, Soil Water,

and Maize Yield in Subtropical Islands in Japan. Journal of Agricultural Science; Vol. 8, No. 9: 44-54. Published by Canadian Center of Science and Education.

**Rochester, I. & M., Peoples.** 2005. Growing vetiches (*Vicia villosa* Roth) in irrigated cotton systems: inputs of fixed N, N fertilizer savings and cotton productivity. Plant and Soil 271: 251-264

**Salvagiotti, F; JM, Castellarín; FJ, Ferraguti & HM, Pedrol.** 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región Pampeana Norte. Ciencia del Suelo, 29(2):199-212.

**Salvagiotti, F; F, Ferraguti; & A, Manlla.** 2012. Respuesta a la Fertilización y Eficiencia en el uso del Nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica N°8: 2-5.

**Salvagiotti, F; F, Ferraguti; JM, Enrico & G, Prieto.** 2014. Respuesta a Nitrógeno en maíz de fecha

tardía según cultivo antecesor. Póster Sesión 1. Resumen expandido. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo – II Reunión Nacional de "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, Argentina. C3 T-186.

**Shearer, G & DH, Kohl.** 1986. N<sub>2</sub> fixation in field settings: estimations based on natural <sup>15</sup>N abundance. Aust J Plant Physiol 13:699-756.

**Toresani, S; G, Prieto; F, Salvagiotti; E, Vita Larrieu; JM, Tirelli & F, Zari.** 2013. Respuesta a la inoculación y a la nutrición con fósforo y azufre del cultivo de arveja en el sur de Santa Fe. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. N°10:17-20.

**Waggar, MG.** 1989. Time of Desiccation Effects on Plant Composition and Subsequent Nitrogen Release from Several Winter Annual Cover Crops. Agron. J. 81:236-241.

**Wright, AL & FM, Hons.** 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:507-513 ◀

**Conocer más.  
Crecer mejor.**

8 y 9 de Mayo  
Metropolitano  
Rosario  
Argentina

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

**Simposio  
Fertilidad  
2019** Conocer más.  
Crecer mejor.



# Manejo de la fertilización nitrogenada en maíz de fecha temprana en el sudeste de Córdoba

Alejo Ruiz<sup>1</sup>, Fernando Salvagiotti<sup>2</sup> y Lucas Borrás<sup>3</sup>

<sup>1</sup>AAPRESID <sup>2</sup>INTA Oliveros <sup>3</sup>UNR-CONICET

aruiz@aapresid.org.ar

## Introducción

En los últimos años la región pampeana se vio afectada por excedentes hídricos y ascenso de napas freáticas (Bertram y Chiacchiera, 2014). Esta problemática impulsó a productores del sudeste de Córdoba a unirse con la finalidad de encontrar una solución a la problemática bajo un sistema coordinado de trabajo. El presente informe surge de los resultados experimentales de una de las líneas que actualmente integra el proyecto llamado "Chacra Justiniano Posse", coordinado por AAPRESID. El mismo apunta a desarrollar tecnologías que tiendan a convertir la oferta hídrica en mejoras para el sistema productivo / empresa agropecuaria. El desafío es mejorar el sistema en su conjunto y disminuir riesgos de anegamientos temporarios y permanentes a través del aumento del consumo de agua y de la productividad. La problemática es abordada en dos niveles, a nivel rotacional (ajuste de intensidad y diversidad de cultivos) y a nivel de cultivo individual (ajuste de tecnologías específicas en cada cultivo).

Los dos factores que principalmente limitan la producción en el cultivo de maíz en la Región Pampeana son la oferta de agua y de nitrógeno (Maddonni et al., 2003). La napa puede constituirse en un factor que permite obtener mayores y más estables rendimientos (Rizzo et al., 2018). Esto se debe a la disponibilidad hídrica en la franja capilar que puede llegar a aportar más de 200 mm a un cultivo anual (Portela et al., 2009; Florio et al., 2014; Cisneros et al., 2013). Nasetto et al (2009) observaron que cuando la profundidad de napa está entre 1.40 y 2.45 m, los rendimientos de maíz se maximizan. Por otra parte, cuando la napa se encuentra cercana a la superficie, puede tener efectos negativos por anegamiento de los suelos, anoxia de raíces, ascenso de sales y pérdidas de nitrógeno (Taboada, 2009; Nasetto et al., 2009; Nasetto et al., 2012; Cisneros et al., 2014).

Los umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada dependen de la potencialidad del

ambiente y de la capacidad de los suelos de proveer de nitrógeno. Para la Región Pampeana norte se determinaron umbrales críticos de N disponible de 137 kg N ha<sup>-1</sup> en situaciones de rendimientos menores a 9520 kg ha<sup>-1</sup>, y de 161 kg N ha<sup>-1</sup> para los casos de rendimientos mayores (Salvagiotti et al., 2011). Para el sudeste de Buenos Aires, Pagani et al. (2008) encontraron umbrales críticos de 111 kg N ha<sup>-1</sup> en años poco favorables y de 150 kg N ha<sup>-1</sup> años de mayor potencial de producción. El nitrógeno del suelo es una importante fuente para las plantas. La oferta y la dosis de fertilizante a utilizar en general se estima midiendo el contenido de nitratos a la siembra (Correndo y García, 2014). Otra forma de mejorar la estimación de la dosis de fertilizante es complementar la información de la disponibilidad de nitratos en el suelo a la siembra con los aportes por mineralización durante el ciclo del cultivo. Para ello se han propuesto como índices de intensidad de mineralización a la concentración de nitratos medidos en V3-V5 (Magdoff et al., 1984) o el nitrógeno anaeróbico (Echeverría et al., 2000; Orcellet et al. 2016). Otros autores también proponen complementar el análisis incluyendo información de la calidad del ambiente (Coyos et al., 2018).

Además de la definición de la dosis correcta, también el momento de aplicación del N en el cultivo de maíz puede ser un factor que afecte la respuesta a la fertilización y la eficiencia en el uso del N. A pesar que la tasa de absorción por parte del cultivo es significativa a partir de V6 (Echeverría et al., 2015), es de uso generalizado la fertilización nitrogenada a la siembra del cultivo. Dependiendo del momento y dosis que se aplica y el tipo de suelo, las pérdidas de nitratos por lixiviación y desnitrificación pueden llegar a ser significativas (Maddonni et al., 2003; Taboada, 2009). Por el otro lado, en suelos con bajas disponibilidades iniciales de nitratos, el atraso de la fertilización puede disminuir los rendimientos potenciales del cultivo (Binder et al., 2000).

En ambientes con influencia de napa, dado que el agua no es limitante se esperan mayores

potenciales de producción y en consecuencia umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada mayores. En la literatura se informa de umbrales para situaciones promedio, pero se desconoce los umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada en ambientes con influencia de napa. Los objetivos del presente trabajo fueron: evaluar la respuesta en rendimiento de maíces tempranos a la fertilización con nitrógeno en ambientes con napa del sudeste de Córdoba; comparar el efecto del momento de aplicación de nitrógeno sobre la respuesta en el rendimiento y eficiencia de uso del nitrógeno; y, determinar qué indicadores de suelo, ambientales y de manejo poseen mayor capacidad de diagnóstico de la respuesta a la fertilización nitrogenada en estos ambientes.

## Materiales y Métodos

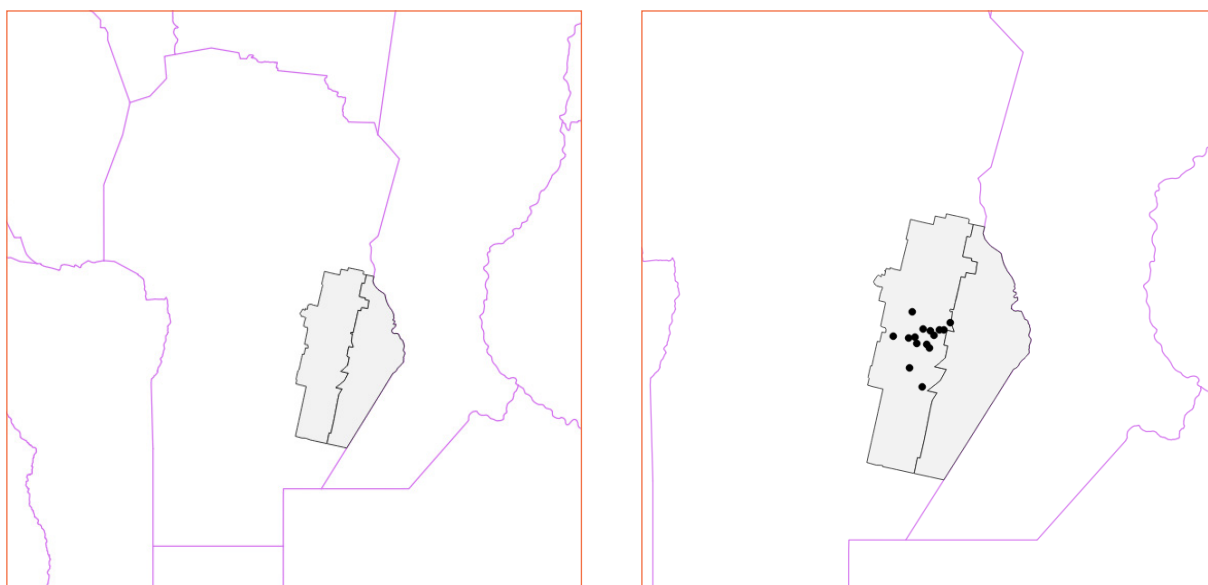
Se realizaron quince experimentos en lotes de producción bajo siembra directa durante las campañas 2016/2017 y 2017/2018 en el sudeste de Córdoba (**Figura 1**). Los sitios se encontraron cercanos a las localidades de Justiniano Posse, Monte Buey y Laborde pertenecientes a los departamentos Unión y Marcos Juárez donde predominan los suelos Hapludoles típicos, Argiudoles típicos y Haplustoles údicos, todos de clase de uso IIc.

En cada lote de producción se demarcó un rectángulo de 20m de ancho por 170m de largo

en el cual no se fertilizó con nitrógeno para poder ubicaron los experimentos.

Se evaluaron cinco dosis de fertilización con nitrógeno (0, 60, 120, 180 y 240 kg N ha<sup>-1</sup>) aplicándose en dos momentos: a la siembra del cultivo y cuando el mismo tenía 6-8 hojas totalmente expandidas (denominadas como S y V7, respectivamente). El diseño experimental utilizado fue completamente aleatorizado con tres repeticiones. El tamaño de cada parcela fue de 3,5m por 15m de largo. La fuente de nitrógeno utilizada fue urea (46-0-0, N-P-K) tratada con NBPT para inhibir su volatilización (eNeTotal de Profertil) y se aplicó al voleo en cobertura total. La siembra se realizó con la maquinaria que dispuso cada productor y en cada sitio la fecha de siembra, elección de genotipo, densidad, fertilización de base y manejo de plagas fue a elección del productor.

Previo a la siembra se tomaron muestras de suelo a tres profundidades 0-20, 20-40 y 40-60 cm, compuestas cada una por 20 sub-muestras o piques. A la profundidad de 0-20 se analizó materia orgánica (%), nitrógeno anaeróbico (Nan), nitratos (NO<sub>3</sub>), P Bray, conductividad y pH, y en las profundidades de 20-40 y 40-60 cm solo nitratos. Además, se midió el contenido de agua en el perfil hasta los 2m de profundidad o hasta donde se encontraba saturado por la presencia de la napa freática. En cada sitio, se colocó un freatímetro para realizar un seguimiento de la misma.



**Figura 1.** Ubicación de los departamentos Unión y Marcos Juárez en la provincia de Córdoba y la ubicación de los experimentos.

Cuando el cultivo se encontraba en V3-V4, se volvió a medir el contenido de nitratos en el suelo a las profundidades de 0-30 cm y 0-60 cm.

En madurez fisiológica se realizó un muestreo de biomasa aérea en un m<sup>2</sup> de superficie en las parcelas que no recibieron fertilización nitrogenada. Se secaron. Luego se las molió y determinó la concentración de N por Kjeldhal en grano y biomasa.

En madurez de cosecha se cosecharon las espigas de 7.4 m<sup>2</sup>, se trilló en una trilladora estática, se lo pesó y midió el contenido de humedad y se corrigió el rendimiento al 14%. En cada muestra se determinó el peso individual del grano y se estimó el número de granos por m<sup>2</sup>.

Considerando el rendimiento de las parcelas testigo, el índice de cosecha y las concentraciones de nitrógeno, se calculó el nitrógeno nativo de cada sitio (la cantidad de N que aporó cada suelo y puede ser tomado por los cultivos).

## Resultados y Discusión

### Descripción de la campaña climática y suelos

En las campañas analizadas se observaron diferencias en las precipitaciones totales acumuladas y en su distribución. En la campaña 16/17, las lluvias fueron un 8% inferiores a las históricas, registrándose un periodo de prácticamente nulas precipitaciones en el mes de noviembre y en la primera quincena de diciembre. En la campaña 17/18, las precipitaciones fueron un 31% menores a los valores históricos, ocurriendo bajas precipitaciones en los meses de enero y febrero (Tabla 1).

A la siembra, debido a las precipitaciones de septiembre (17/18) y octubre (16/17), todos los sitios se encontraban en capacidad de campo o próximo a ello (Tabla 2). A excepción del sitio Mz, todos los demás contaban con napas cercanas a la siembra del maíz. Hubo sitios que iniciaron las campañas con las napas próximas a 1 m, mientras que en otros a 2 m.

**Tabla 1.** Precipitaciones quincenales de septiembre a febrero en la localidad de Justiniano Posse para las dos campañas de estudio y precipitaciones medias mensuales históricas (últimas 30 campañas).

Campaña	sep		oct		nov		dic		ene		feb		Total
	1ra	2da	1ra	2da	1ra	2da	1ra	2da	1ra	2da	1ra	2da	
16/17	0	4	73	73	17	0	5	164	108	23	33	96	596
17/18	35	53	9	25	34	46	23	184	8	25	0	3	445
Histórico	43		92		125		141		124		123		648

**Tabla 2.** Variables de manejo y análisis químico de suelo y agua de los diferentes sitios.

Sitio	Fecha siembra	Híbrido	Densidad	Antecesor	AU Siembra	Napa*	MO	N <sup>1</sup>	NAN	P Bray	CE	pH	N <sup>2</sup>	N <sup>3</sup>
			pl m <sup>2</sup>			m	%	kg ha <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	ppm	mmhos cm <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>
Pg	22-sep	DK 7210	7.9	Tg/Sj	94%	1.5-3.0	2.5	71	40	12	0.10	5.8	40	13
Oz	05-oct	DK 7210	8.3	Tg/Sj	98%	1.0-2.0	2.6	53	48	13	0.09	6.0	63	24
Mza	09-oct	DK 7210	7.2	Soja	98%	0.7-2.0	2.3	71	42	15	0.10	5.9	51	23
Pz	10-oct	DK 7210	9.0	Soja	91%	1.5-3.0	2.4	63	43	8	0.09	6.0	46	21
Th	09-oct	DK 7210	8.0	Soja	93%	2.0-3.0	2.4	71	39	13	0.11	6.0	77	30
As	23-oct	DK 7210	7.7	Tg/Sj	100%	1.0-2.0	2.3	59	39	11	0.08	6.0	60	24
Ru	08-oct	ACA 470	7.3	Tg/Sj	100%	0.7-2.0	2.4	59	40	11	0.10	5.9	50	17
Oz2	16-sep	DK 7320	7.9	Tg/Sj	100%	1.0-2.5	2.7	64	50	13	0.10	5.5	55	23
As2	17-sep	DK 7210	8.7	Tg/Sj	100%	1.0-2.5	2.7	65	54	17	0.13	5.7	91	33
Ro	19-sep	DK 7310	8.1	Soja	100%	1.5-3.0	2.7	60	50	11	0.10	5.5	62	27
Ru2	20-sep	ACA 473	7.8	Tg/Sj	98%	2.0-3.5	2.4	55	41	12	0.10	5.9	53	23
Pg2	20-sep	DK 7210	8.1	Soja	100%	1.0-2.5	2.7	74	45	25	0.09	5.3	69	29
Mzi	05-oct	DK 7210	8.6	Tg/Sj	95%	+ 2.0	2.8	50	42	11	0.10	5.5	75	33
Co	09-oct	DK 7210	7.3	Tg/Sj	100%	1.0-2.5	2.7	64	53	35	0.12	5.6	86	43
Th	06-oct	DK 7320	7.6	Tg/Sj	100%	1.0-2.5	2.5	54	46	8	0.09	5.6	53	20

\*Profundidad de napa al inicio y final del ciclo del cultivo <sup>1</sup>N-NO<sub>3</sub> a 0-60 cm a la siembra <sup>2</sup>N-NO<sub>3</sub> a 0-60 cm en V3-V4 <sup>3</sup>N-NO<sub>3</sub> a 0-30 cm en V3-V4

Los contenidos de materia orgánica oscilaron entre 2.3% y 2.8%. Los valores de NAN variaron entre 39 y 54 mg kg<sup>-1</sup>. El P extractable (Bray 1) se encontraba en niveles críticos en la mayoría de los sitios, habiendo dos sitios con 8 ppm de dicho nutriente. Respecto al nitrógeno de nitratos 0-60 cm a la siembra, los mismos variaron entre 53 y 74 kg ha<sup>-1</sup> (en promedio 62 kg ha<sup>-1</sup>).

### Rendimientos y nitrógeno nativo

Los rendimientos obtenidos fueron elevados en ambas campañas siendo superiores en la campaña 16/17 (14276 vs. 13235 kg ha<sup>-1</sup>). En todos los sitios se encontró respuesta a la fertilización a la siembra y en V7. La dosis tuvo un efecto muy importante, el cual varío según el sitio (Tabla 3). El efecto del momento de fertilización fue menos

**Tabla 3.** Análisis de la varianza para rendimiento según dosis, momento, sitio y sus interacciones.

Factor	Significancia	Variación
Dosis	p<0.01	57%
Sitio	p<0.01	20%
Momento	0.63	0%
Dosis x Sitio	p<0.01	8%
Momento x Sitio	p<0.01	4%
Dosis x Momento	p<0.01	1%
Dosis x Momento x Sitio	0.49	0%
Residual		10%

significativo que la dosis, interaccionando con el sitio y dosis (aunque explican una proporción menor de la variabilidad total de los datos). La interacción entre los tres factores no fue significativa.

Los rendimientos promedio de los tratamientos sin fertilizar variaron entre 7 551 y 12 778 kg ha<sup>-1</sup> y los máximos se obtuvieron en todos los casos cuando se aplicaron 240 kg N ha<sup>-1</sup>, a la siembra o V7 dependiendo del sitio, y variaron entre 14 155 y 17 654 kg ha<sup>-1</sup> (Tabla 4). Fue mayor la variabilidad del rendimiento en los tratamientos testigo entre sitios que la observada en los tratamientos que recibieron la dosis más alta de N (17% vs. 7%). Los rendimientos de los tratamientos sin agregado de nitrógeno no se encontraron correlacionados con los máximos alcanzables.

En los tratamientos sin fertilización con N, la concentración de N en grano varió entre 0.81 y 0.95%, y teniendo en cuenta que las proteínas se hayan constituidas por un 16% de N (FAO, 2002), el contenido proteico en grano varió entre 5.0 y 5.9%. Esto pone en evidencia la capacidad de diluir proteína (Abdala et al., 2018) y la elevada eficiencia en el uso del N que poseen los híbridos actuales (DeBruin et al., 2017).

El nitrógeno nativo varió entre 82 y 158 kg N ha<sup>-1</sup>, siendo el promedio 123 kg N ha<sup>-1</sup>. El índice de cosecha del nitrógeno promedio fue de 67% en las parcelas sin fertilización con N.

**Tabla 4.** Rendimientos de los tratamientos ON y 240N, índice de cosecha y concentraciones de N del tratamiento sin fertilización nitrogenada y N nativo por sitio.

N°	Sitio	Rto ON	Rto 240N	IC	Concentración N	IC N	N nativo	
					Biomasa	Grano		
		kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	%	%	%	%	kg ha <sup>-1</sup>
1	Pg	12 192	17 124	47	0.34	0.89	70	134
2	Oz	9 745	17 654	43	0.29	0.82	68	101
3	Mza	12 321	14 636	49	0.41	0.93	69	145
4	Pz	12 778	16 987	51	0.43	0.93	69	149
5	Th	12 155	15 445	50	0.42	0.92	69	140
6	As	12 025	16 039	46	0.34	0.88	69	134
7	Ru	7 551	15 640	45	0.34	0.85	68	82
8	Oz2	8 690	16 113	43	0.34	0.88	66	100
9	As2	12 547	16 112	46	0.43	0.95	65	158
10	Ro	10 287	14 451	50	0.36	0.87	71	109
11	Ru2	9 829	14 155	44	0.38	0.88	64	117
12	Pg2	12 447	15 502	48	0.46	0.95	66	155
13	Mzi	10 748	16 750	42	0.32	0.83	65	118
14	Co	9 576	14 561	40	0.32	0.81	63	107
15	Th2	7 829	14 587	45	0.37	0.92	67	93
Promedio		10 765	15 717	46		0.89	67	123



### Indicadores de la respuesta a la fertilización nitrogenada

En general, hubo incrementos significativos en el rendimiento del cultivo hasta las dosis de 180 y 240 kg N ha<sup>-1</sup>. El rendimiento aumentó en promedio un 42% al subir la dosis de fertilización, y este aumento se debió a un mayor número de granos (16%) y peso de los mismos (23%). La respuesta a la fertilización nitrogenada osciló entre el 16 y 92%. Al ajustar un modelo lineal-plateau para todos los sitios entre rendimiento y N disponible (suelo + fertilizante) se obtuvo un umbral de respuesta de 215 kg ha<sup>-1</sup> N.

Por medio de modelos lineales generales y mixtos (InfoStat, Di Rienzo et al., 2017) se ajustó un modelo cuadrático para todos los sitios y ambos momentos de fertilización considerando a la dosis de N como efecto fijo y al sitio y su interacción con N como aleatorios. Se obtuvo un modelo promedio (Figura 2) cuya ecuación es:  $Y = 10\,850 + 40.9N - 0.09N^2$  (ecuación 1) y con un ajuste de 0.53 (R<sup>2</sup>). Al considerar al sitio como efecto aleatorio, se obtuvieron la ordenada al origen y pendiente por sitio ( $\beta_0$  y  $\beta_1$  respectivamente) (Tabla 5) mejorando considerablemente el ajuste (R<sup>2</sup> = 0.85).

Existen grandes diferencias entre sitios en  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . A su vez, éstas se encuentran correlacionadas negativamente (-0.81). Al evaluar la relación entre las diferentes variables ambientales y de manejo (Tabla 6), las únicas que pudieron explicar  $\beta_0$  y  $\beta_1$

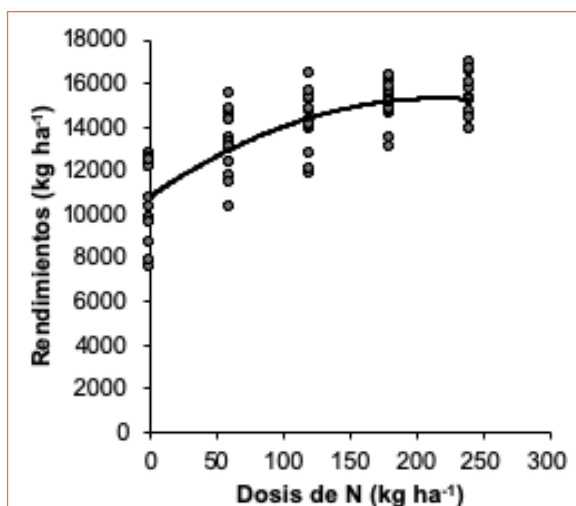


Figura 2. Rendimientos en función de la dosis de N aplicada. La línea representa la ecuación 1 y los datos son promedio de los dos momentos de fertilización para cada sitio

son el contenido de N-NO<sub>3</sub> a 0-60cm medido a la siembra y el cultivo antecesor. Otra variable que explicó considerablemente mejor este resultado fue el nitrógeno nativo.

Tabla 5.  $\beta_0$  y  $\beta_1$  de los diferentes sitios.

Sitio	$\beta_0$	$\beta_1$
Pg	12 129	40.9
Oz	10 193	49.6
Mza	12 263	31.0
Pz	13 079	37.0
As	12 210	37.6
Ru	8 361	49.3
Oz2	8 549	46.8
As2	12 385	36.8
Ro	10 429	37.0
Ru2	10 179	40.0
Pg2	12 468	33.6
Mzi	10 593	46.1
Co	9 957	43.5
Th2	7 844	47.9
Th	12 116	35.5

Tabla 6. Efecto de diferentes variables ambientales y de manejo asociadas a las variaciones de  $\beta_0$  y  $\beta_1$  entre sitios.

Variable	$\beta_0$	$\beta_1$
<i>Ambiente</i>		
Tipo de suelo	ns	ns
Rango de napa	ns	ns
Precipitaciones	ns	ns
Agua útil a la siembra	ns	ns
Materia orgánica	ns	ns
Fósforo	ns	ns
Conductividad	ns	ns
pH	ns	ns
Nitrógeno anaeróbico	ns	ns
N-NO <sub>3</sub> 0-60cm siembra	0.56	-0.68
N-NO <sub>3</sub> 0-60cm V3-V4	ns	ns
N-NO <sub>3</sub> 0-30cm V3-V4	ns	ns
<i>Manejo</i>		
Fecha de siembra	ns	ns
Densidad lograda	ns	ns
Antecesor	0.28	0.47
Fungicida	ns	ns
Nitrógeno nativo	0.94	-0.85

### Efecto momento de fertilización

Con la dosis de  $60 \text{ kg N ha}^{-1}$  hubo diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en rendimiento a favor de V7 ( $500 \text{ kg ha}^{-1}$ ), mientras que con  $240 \text{ kg N ha}^{-1}$  fue a favor de la siembra ( $300 \text{ kg ha}^{-1}$ ). En dosis intermedias no hubo diferencias entre momentos de fertilización.

En los sitios con mayor N nativo ( $130\text{-}160 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), la diferencia promedio entre momentos de fertilización fue de  $363 \text{ kg ha}^{-1}$ , pero en los sitios con menor N nativo ( $80\text{-}120 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) el momento de fertilización fue más crítico, siendo la diferencia entre momentos de  $1022 \text{ kg ha}^{-1}$  ( $p < 0.01$ ).

Al analizar que sucedió entre campañas, en la campaña 16/17 fue superior la respuesta en fertilizaciones a la siembra que V7, mientras que en la campaña 17/18, fue conveniente en V7 ( $p < 0.05$ , **Figura 3A y 3B**). En la campaña 16/17 fueron escasas las lluvias entre V7 e inicios del periodo crítico, incorporándose el nitrógeno recién a fines de diciembre, coincidiendo con R1 en gran parte de los sitios.

### Conclusiones

La respuesta a la fertilización con nitrógeno en ambientes con napa fue variable dado que el nitrógeno nativo mostró ser diferente entre am-

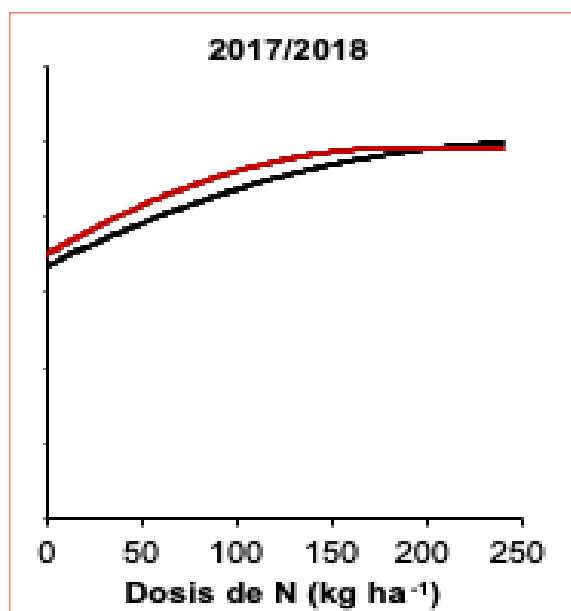
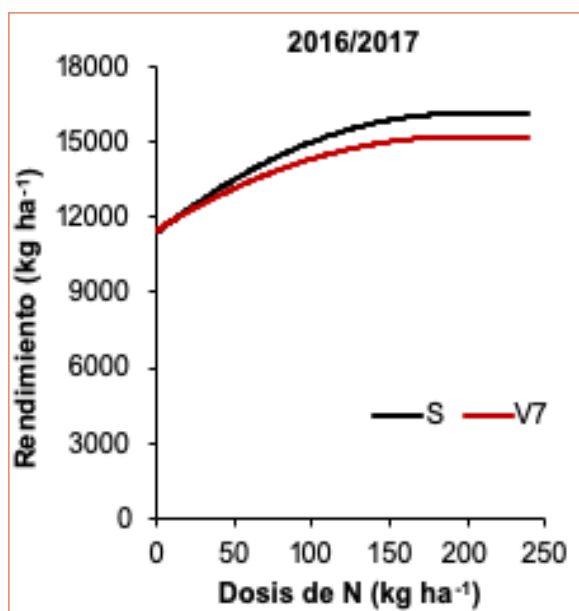
bientes (entre  $80$  a  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de N). El umbral de respuesta promedio para todos los sitios fue de  $215 \text{ kg ha}^{-1}$  de N disponible (suelo + fertilizante).

Los nitratos medidos a la siembra, el cultivo antecesor y en especial el nitrógeno nativo surgen como datos útiles para predecir la respuesta a la fertilización en los ambientes de la zona.

El momento de fertilización tuvo un efecto de menor impacto respecto a la dosis de nitrógeno. El efecto del momento dependió del sitio-año.

### Agradecimientos

A todos los que participan en el funcionamiento de la Chacra Justiniano Posse, a GIMUCE (Grupo de Investigación Manejo y Utilización de Cultivos Extensivos), a Profertil, a los laboratorios de Química y Física de Suelo de la Estación Experimental de INTA Marcos Juárez y a la Fundación Ciencias Agrarias de la UNR.



**Figura 3A y 3B.** Curvas de respuesta a la fertilización según momento de fertilización para ambas campañas evaluadas.

## Bibliografía

- Abdala, L.J., L.N. Vitantonio-Mazzini, J.A. Gerde, F. Martí Ribes, G. Murtagh y L. Borrás. 2018. Dry milling grain quality changes in Argentinean maize genotypes released from 1965 to 2016. *Field Crops Research*, 226: 74-82.
- Binder, D.L., H.D. Sander y D.T. Walter. 2000. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. *Agronomy Journal* 92: 1228-1236.
- Bertram, N. y S. Chiacchiera. 2014. Ascenso de napas en la Región Pampeana: ¿Consecuencia de los cambios en el uso de la tierra? INTA EEA Marcos Juárez.
- Cisneros, J., H.A. Gil, J.D. De Prada, A. Degioanni, G.A. Cantero, O. Giayetto, J.P. Ioele, O.A. Madoery, A. Masino y J. Rosa. 2014. Estado actual, pronósticos y propuestas de control de inundaciones en el centro-este de la provincia de Córdoba. Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
- Cisneros, J., M. Scilingo, O. Giayetto, F. Morla y E.G. Jobbágy. 2013. Uso del modelo de simulación AquaCrop-FAO para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. En: *Actas del XXIV Congreso Nacional del Agua*. San Juan, Argentina.
- Correndo, A. y F. García. 2014. Diagnóstico del nitrógeno en el cultivo de maíz: ¿Cómo lograr un análisis de suelo confiable? En: *Manejo eficiente del nitrógeno en maíces flint*, Ed.: Borrás, L. Capítulo 8.
- Coyos, T., L. Borrás y B.L. Gambin. 2018. Site-specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown maize in Central Argentina. *Agronomy Journal*, 110, 1544-1553.
- DeBruin, J.L., J.R. Schussler, H. Mo y M. Cooper. 2017. Grain yield and nitrogen accumulation in maize hybrids released during 1934 to 2013 in the US Midwest. *Crop Sci.* 57(3), 1431-1446.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, C.W. Robledo. 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: <http://www.infostat.com.ar>
- Echeverría, H.E., N. San Martín y R. Bergonzi. 2000. Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ciencias del Suelo* 18, 9-16.
- FAO. 2002. Food Energy—Methods of Analysis and Conversion Factors, Report of a Technical Workshop. FAO Food and Nutrition Paper 77.
- Florio, E., J. Mercáu, E.G. Jobbágy y M. Nosetto. 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agric. Water Manage.* 146, 75-83.
- Maddonni, G.A., R.A. Ruiz, P. Villariño e I. García de Salamone. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: *Producción de granos: bases funcionales para su manejo*, Eds.: Satorre et al. Capítulo 19.
- Magdoff, F.R., D. Ross y J. Amadon. 1984. A soil test for nitrogen availability to maize. *Soil Science Society of America Journal* 48, 1301-1304.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson y G.A. Sznajder. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Research* 113, 138-148.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, A.B. Brizuela y R.B. Jackson. 2012. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154, 2-11.
- Orcellet, J.M., N. Reussi Calvo, H. Sainz Rozas, N. Wyngaard y H.E. Echeverría. 2016. Anaerobically Incubated Nitrogen Improved Nitrogen Diagnosis in Corn. *Agronomy Journal* 109, 1-8.
- Pagani, A., H.E. Echeverría, H.R. Sainz Rozas y P.A. Barbieri. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26, 183-193.
- Portela, S.I., A.E. Andriulo, E.G. Jobbágy y M.C. Sasal. 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 134, 277-286.
- Rizzo, G., J.I.R. Edreira, S.V. Archontoulis, H.S. Yang y P. Grassini. 2018. Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the US Corn Belt? *Glob. Food Sec.* 18, 27-34.
- Salvagiotti, F., J.M. Castellarin, F.J. Ferraguti y H.M. Pedrol. 2011. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29, 199-212.
- Salvagiotti, F., H.M. Pedrol y J.M. Castellarin. 2002. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. II Concentración de nitratos en el suelo en V4-V6. Para mejorar la producción 20.
- Taboada, M.A. 2009. Alteraciones de la fertilidad causadas por el hidromorfismo edáfico. En: *Alteraciones de la fertilidad de los suelos: el halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones*, Eds.: Taboada, M.A.; Lavado, R.S. Capítulo 4. ◀

# Fertilización nitrogenada en fechas de siembra tempranas y tardías de maíz

Juan M. Pautasso<sup>1</sup>; Nicolás Maltese<sup>2,3</sup>; Ricardo M. Melchiori<sup>3</sup>

<sup>1</sup>AER INTA Diamante; <sup>2</sup>Becario CONICET – Doctorado; <sup>3</sup>EEA INTA Paraná  
pautasso.juan@inta.gob.ar

## Introducción

El área cultivada con el cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en Argentina representa en promedio el 18% del área total, mientras que la producción media de cultivo en los últimos 10 años ronda los 20 millones de toneladas, representando un 25% de la producción total de granos. El maíz, es el segundo cultivo en importancia en el país luego de la soja (FAOSTAT, 2016). En la última década, en la región pampeana argentina se difundió rápidamente la alternativa de sembrar maíces en fecha tardía, técnica que representa actualmente más del 50% de la superficie total sembrada con maíz (BCBA, 2018).

La aparición de nuevos eventos biotecnológicos incorporados al cultivo ha permitido retrasar la fecha de siembra, mejorando la estabilidad en el rendimiento a expensas de un menor rendimiento potencial. La siembra en fechas tempranas a inicios de la primavera (septiembre-octubre) permiten lograr altos rendimientos (Otegui et al., 1995) y reducir la incidencia de adversidades bióticas con mayor prevalencia en los meses estivales (e.g. *Diatraea saccharalis* (Fabricius), *Spodoptera frugiperda* (Smith), *Puccinia sorghi* (Schwein), *Puccinia polysora* (Schwein) and *Excerohilum turcicum* (Pass.)). Sin embargo, las siembras tempranas presentan un mayor riesgo productivo asociado a un mayor desbalance hídrico próximo a floración (Maddonni, 2012), mientras que siembras tardías reducen el riesgo del cultivo determinando mayor estabilidad de los rendimientos debido a un balance hídrico más equilibrado (Maddonni, 2012; Mercu y Otegui, 2014). A su vez, el barbecho más prolongado y una siembra en época con mayores temperaturas incrementa la disponibilidad de nitrógeno (N) en el suelo para los maíces en siembras tardías. No obstante, el periodo crítico de maíces tardíos transcurre en el mes de febrero con niveles decrecientes de radiación solar y temperatura que limitan el rendimiento potencial respecto a siembras tempranas.

La disponibilidad de N es uno de los factores limitantes en la producción de maíz. En términos generales, las recomendaciones para la fertilización nitrogenada para el cultivo en la región pampeana argentina están relacionadas con el N disponible (N de nitratos disponible en el suelo más N de fertilizante) al momento de la siembra, con umbrales que varían entre 137 y 161 kg N ha<sup>-1</sup> en el caso de los maíces tempranos (Echeverría y col., 2014). Algunas referencias evaluaron la respuesta a la fertilización con N en maíz tardío (Díaz Valdez et al., 2014), y reportaron menor eficiencia de uso del N (EUN) (Papucci et al., 2016). Adicionalmente, Melchiori et al. (2004) reportaron interacciones significativas de fecha de siembra x N, con una mayor respuesta al agregado de N en los maíces tempranos respecto a los tardíos, sin embargo las comparaciones de umbrales de N disponible para distintas fechas de siembra no ha sido ampliamente explorado bajo diferentes condiciones sitio-año. En efecto, debido al menor rendimiento potencial y la mayor disponibilidad de N de las fechas tardías puede esperarse una menor eficiencia de uso del N de fertilizantes. En virtud de esto, es útil generar información sobre la eficiencia agronómica de uso del N (EUNa), complementaria a las recomendaciones de fertilización con N.

El objetivo de este trabajo fue comparar la respuesta en rendimiento al agregado de N, los umbrales de respuesta y la EUNa en fechas de siembras tempranas y tardías de maíz utilizando un amplio set de datos (sitio-año) correspondiente a la provincia de Entre Ríos.

## Materiales y Métodos

Durante 7 campañas desde 2009 a 2017, se realizaron 38 experimentos de fertilización nitrogenada en diferentes sitios de la provincia de Entre Ríos (Tablas 1 y 2), 21 de los cuales correspondieron a fechas de siembra temprana (septiembre-octubre) y 17 a fechas de siembra tardías (mediados de diciembre).



El diseño de los experimentos fue en bloques completos al azar con tres repeticiones. Las dosis agregadas de N variaron según los ensayos con un rango entre 0 y 270 kg N ha<sup>-1</sup>, utilizándose urea como fuente de N, la cual fue aplicada al voleo entre los estadios de tres y seis hojas del cultivo (V3-V6). Las densidades de siembra utilizadas en todos los experimentos varió entre 6 y 7 pl m<sup>2</sup>, con valores similares a los utilizados por los productores de la región. La superficie de cada unidad experimental fue de cinco surcos de ancho con una separación entre hileras de 0,52 m y una longitud de 10 m.

Todos los cultivos se fertilizaron a la siembra con fertilizantes fosfatados. Al momento de la siembra se extrajeron muestras de suelo (0-20

cm) por bloques para determinar fósforo (P) Bray I, y N-nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

La cosecha se realizó en forma manual en los dos surcos centrales sobre 8 metros de largo en cada tratamiento y bloque. El rendimiento se ajustó a 14.5% de humedad. Adicionalmente, el rendimiento se expresó en términos relativos (RR), haciendo el cociente entre el rendimiento de cada tratamiento y el rendimiento de la dosis mayor aplicada en cada experimento. Para el cálculo de umbrales de nitrógeno disponible por encima de los cuales ya no se detecta incremento en el rendimiento frente al aumento en el N disponible se ajustaron modelos lineal plateau entre el RR y el N disponible (N<sub>s</sub>+N<sub>p</sub>), para ambas fechas de siembra (i.e. tempranas y tar-

**Tabla 1.** Valores de N-Nitratos disponible, fósforo (P) Bray I, rendimientos promedios de los tratamientos control sin N, fertilizados con N y significancia (P-valor) de los tratamientos de fertilización para los 21 experimentos realizados en fecha de siembra temprana.

Experi- mento	Cam- paña	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	P. Bray I (ppm)	Rendimiento		Efecto Fertilización con N  P-valor*
				Control sin N	Fertilizado con N**	
				(kg ha <sup>-1</sup> )		
1	2009	22,3	8	8712	8893	0,95
2	2009	21,7	8	6444	9823	< 0,01
3	2009	22,8	7	9142	11710	< 0,01
4	2009	23,9	9	7006	8476	0,01
5	2010	35,8	12	5638	5846	0,53
6	2010	38,0	8	5026	5667	0,77
7	2010	34,2	7	5117	5663	0,57
8	2012	8,1	15	7076	8591	0,04
9	2013	47,2	12	9211	10104	0,04
10	2013	23,3	8	4915	5762	0,07
11	2014	15,7	13	3389	6573	0,02
12	2014	31,5	11	7944	9188	0,03
13	2014	22,3	sd	7617	11606	< 0,01
14	2014	8,7	sd	7895	11032	0,01
15	2015	22,3	sd	4947	6803	0,12
16	2014	22,3	sd	8453	11326	< 0,01
17	2014	22,3	sd	8194	12340	< 0,01
18	2015	8,7	sd	4779	7356	0,02
19	2016	16,8	7	8547	10051	0,06
20	2017	20,6	14	5176	12207	< 0,01
21	2017	29,3	22	8015	8783	0,09

\*P-valor < 0,05 indica diferencias significativas debidas a la fertilización nitrogenada.

\*\*Valor promedio de todas las dosis de N evaluadas.

días). La respuesta al agregado de N se calculó como la diferencia de rendimiento entre cada tratamiento de N y la menor dosis de N de cada ensayo. La eficiencia agronómica de uso del nitrógeno ( $EUN_o$ ) se calculó como el cociente entre la respuesta al agregado de N y la dosis de N aplicada.

Para evaluar el efecto de la fertilización se realizaron análisis de varianza y comparaciones de medias mediante pruebas de Tukey ( $P < 0,05$ ), utilizando el programa estadístico InfoStat versión 2011 (Di Rienzo et al., 2018).

## Resultados

En las **Tablas 1 y 2** se detalla información correspondiente a los experimentos de maíz temprano y tardío. Se puede observar que el 71% de los experimentos de fertilización que se realizaron en maíces sembrados en fechas tempranas tuvieron efecto significativo del agregado de N

sobre el rendimiento (**Tabla 1**), mientras que en el caso de los maíces tardíos, sólo se determinaron incrementos de rendimiento por efecto de la fertilización en 1 de cada 3 experimentos realizados (**Tabla 2**).

El rendimiento promedio de los maíces tempranos sin fertilización nitrogenada presentó un rango de 3389-9211 kg ha<sup>-1</sup>, mientras que los fertilizados tuvieron un rango mayor de 5663 y hasta 12340 kg ha<sup>-1</sup> (**Tabla 1**). Mientras que los maíces tardíos en ambos tratamientos, control y fertilizados, presentaron un menor rango de variación de los rendimientos de 4785-9140 kg ha<sup>-1</sup> y 5584-10288 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente (**Tabla 2**).

En un análisis conjunto, los maíces tempranos presentaron rendimientos promedios significativamente mayores a los tardíos ( $P < 0,05$ ; datos no mostrados). Por otra parte, dividiendo los tratamientos control de los fertilizados con N, se observó una interacción significativa de N x

**Tabla 2.** Valores de N-Nitratos disponible, fósforo (P) Bray I, rendimientos promedios de los tratamientos control sin N, fertilizados con N y significancia (P-valor) de los tratamientos de fertilización para los 17 experimentos realizados en fecha de siembra tardía.

Experimento	Campaña	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	P Bray I (ppm)	Rendimiento		Efecto Fertilización
				Control sin N	Fertilizado con N**	P-valor*
				(kg ha <sup>-1</sup> )		
22	2012	26,1	24	7878	8662	0,54
23	2012	17,4	sd	6627	10059	0,001
24	2012	12,5	sd	8485	10030	0,04
25	2012	17,4	sd	6498	10009	0,25
26	2012	15,7	sd	8543	10288	< 0,0001
27	2013	46,7	29	8808	9163	0,14
28	2013	33,1	9	9140	9884	0,32
29	2014	13,6	15	6813	6723	0,16
30	2014	13,6	15	5133	5584	0,04
31	2014	19,5	sd	8091	8395	0,18
32	2014	19,5	sd	8996	9848	0,01
33	2014	19,5	sd	8931	9176	0,29
34	2014	19,5	sd	7409	9392	0,60
35	2015	21,7	42	4847	6378	0,18
36	2015	21,7	42	5891	6744	0,33
37	2016	15,2	29	4785	7390	0,04
38	2016	15,2	29	6212	7167	0,10

\*P-valor < 0,05 indica diferencias significativas debidas a la fertilización nitrogenada.

\*\*Valor promedio de todas las dosis de N evaluadas.

fecha de siembra sobre el rendimiento ( $P < 0,01$ ; Fig.1), donde los maíces tempranos tuvieron rendimientos mayores que los tardíos cuando se aplicó fertilizante nitrogenado, mientras que el rendimiento medio de los tratamientos control fue similar para las fechas de siembra tempranas y tardías ( $P > 0,05$ ).

En la **Tabla 3** se muestran la respuesta en rendimiento obtenidas para los tratamientos fertilizados y la  $EUN_a$  para las dos fechas de siembra evaluadas. La respuesta a la fertilización y la  $EUN_a$  fueron significativamente mayores en los maíces tempranos ( $P < 0,05$ ), en concordancia a lo encontrado por Papucci et al. (2016). En efecto, la mayor respuesta de los maíces sem-

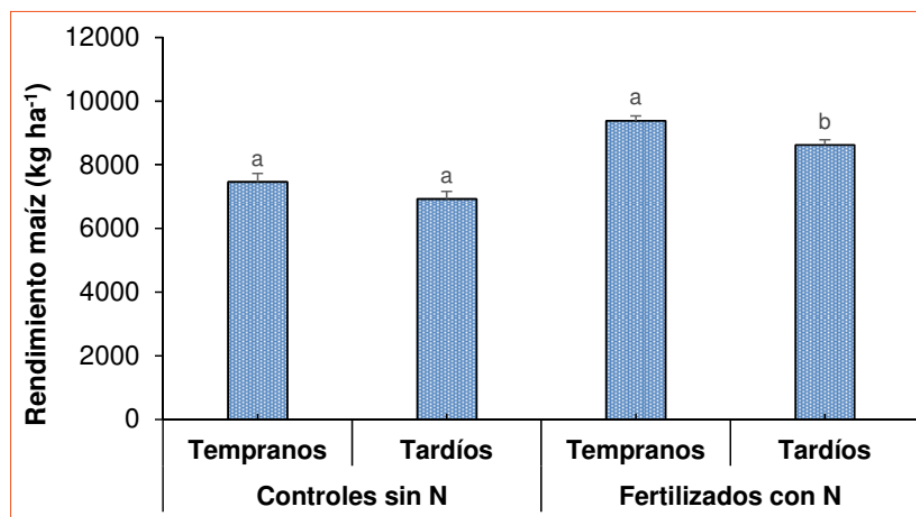


Figura 1. Rendimiento de maíz en función del agregado de N y de la fecha de siembra. Medias con letras distintas para cada tratamiento de agregado de N son estadísticamente diferentes entre sí ( $P < 0,05$ ).

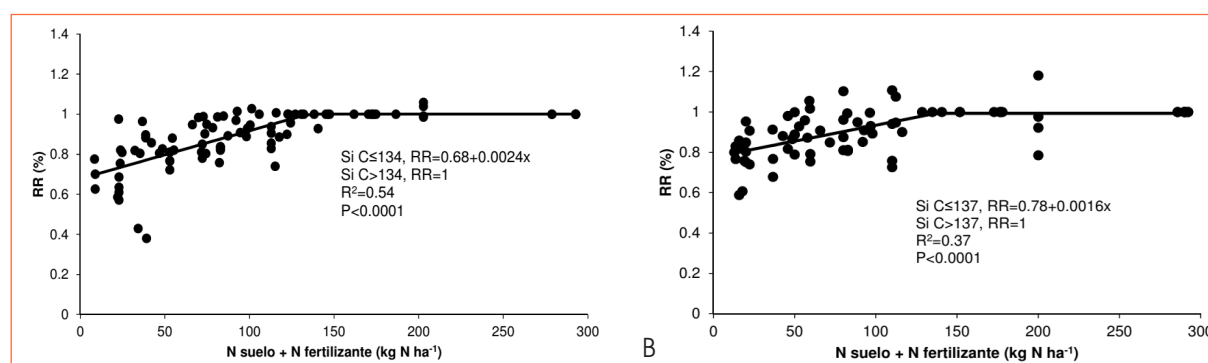


Figura 2. Rendimiento relativo del cultivo de maíz (RR) en función del nitrógeno disponible (N suelo a la siembra + N de fertilizante) para experimentos de fertilización nitrogenada en fechas de siembra temprana ( $n=92$ ) (A) y tardía ( $n=75$ ) (B). La línea sólida indica la función lineal plateau ajustada para cada set de datos.

**Tabla 3.** Respuesta en rendimiento al agregado de N en maíz y eficiencia de uso agronómica ( $EUN_a$ ) para distintas fechas de siembra.

Fecha de siembra	Respuesta		$EUN_a$	
	(kg ha <sup>-1</sup> )		(kg maíz kg N <sup>-1</sup> )	
Temprano	2280	a	25,3	a
Tardío	1106	b	13,1	b

\*Medias con letras distintas indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ).

brados en inicios de primavera está relacionada al ambiente fototermal más favorable para el crecimiento durante el periodo crítico, lo cual permite fijar un elevado número de granos y, por ende, alcanzar mayores rendimientos que los maíces tardíos. En contraposición, éstos últimos ubican su periodo vegetativo en momentos con elevada temperatura (*i.e.* diciembre-enero), lo cual incrementa la mineralización de N desde la materia orgánica del suelo y la disponibilidad de N. El efecto combinado de estas condiciones, sumado a que el periodo reproductivo transcurre en momentos bajo condiciones declinantes de radiación y temperatura (*i.e.* febrero) determina un menor rendimiento y  $EUN_g$  de los maíces tardíos. En línea con lo anteriormente mencionado, en la **Fig. 2A y B** se puede observar como a bajas disponibilidades de N, los maíces tardíos presentan un mayor RR comparado con los tempranos.

En la **Fig. 2A y B** se detallan los modelos lineal-plateau ajustados para los maíces tempranos y tardíos respectivamente. En ambas fechas de siembra, el RR aumentó con el incremento en la disponibilidad de N hasta un umbral (C) donde ya no se observaron cambios. No se detectaron diferencias en los umbrales de N disponible para fechas de siembra temprana y tardía, con valores de 134 y 137 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estos umbrales resultaron similares a otros anteriormente reportados para la región, los cuales varían entre 130 kg N ha<sup>-1</sup> (Melchiori et al., 2001) y 120 kg de N (Mistrorigo et al., 1997), para maíces de hasta 9000 kg ha<sup>-1</sup> de rendimiento. Sin embargo, se observaron diferencias en la magnitud de la respuesta a la fertilización entre fechas de siembra, donde los tratamientos control rindieron un 68% del máximo RR logrado cuando la fecha de siembra fue temprana, mientras que los tratamientos control en fechas tardías presentaron valores cercanos al 80% del máximo RR logrado. Adicionalmente, las pendientes obtenidas en los modelos, coincidentemente con la información de  $EUN_g$  antes informada, fue menor en maíces tardíos comparado con los tempranos (0,0016% RR (kg N ha<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup> vs. 0,0024% RR (kg N ha<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>).

## Conclusiones

Los resultados reportados demuestran que los rendimientos promedios del cultivo de maíz fueron menores cuando la fecha de siembra fue retrasada. Aunque no se detectaron diferencias en los

umbrales de respuesta a la fertilización, los maíces tempranos presentaron una mayor respuesta al agregado de fertilizante nitrogenado comparado con los maíces tardíos y una mayor  $EUN_g$ . Finalmente, el amplio set de datos utilizado generado bajo diversas condiciones ambientales (sitio-año) en la región reafirma la utilidad de los umbrales determinados como herramientas de guía para la recomendación de fertilización nitrogenada en maíz.

## Referencias

- BCBA. 2018. Bolsa de cereales de Buenos Aires. ReTTA. Congreso Maizar, 22 de mayo, 2018, Bs. As.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. y C.W. Robledo. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar> [Verificación: Junio 2018]
- Echeverría H.E.; H. Sainz Rozas y P. Barbieri. 2014. Maíz y Sorgo. p. 435-478. En H. E. Echeverría y F. O. García (Eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- FAOSTAT. 2016. Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (2014). Production Available in: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/S> [Review date: April 2015].
- Maddonni, G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. Theor. Appl. Climatol., 107, 325-345.
- Melchiori R., Caviglia O., Valentinuz O., Liendo G. y P. Rodríguez. 2004. Efecto del nitrógeno sobre el peso de grano de maíz en el centro-oeste de Entre Ríos. En actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná. 22 al 25 de junio de 2004. p. 226.
- Mercau, J. L., & Otegui, M. E. 2014. A modeling approach to explore water management strategies for late-sown maize and double-cropped wheat-maize in the rainfed Pampas region of Argentina. Practical Applications of Agricultural System Models to Optimize the Use of Limited Water, (practicalapplic), 351-374.
- Mistrorigo D., Valentinuz O. 2004. Fertilización de Maíz en siembra directa en suelos vertisoles y molisoles de ER. Revista científica agropecuaria de la FCA UNER. 2004. Pág. 99-107.
- Mistrorigo D., Valentinuz O., De Carli R. 1997. Fertilización de Maíz en siembra directa en ER. VI Congreso Nacional de Maíz. Argentina. Pág. 114-120.
- Otegui, M.E., Nicolini, M.G., Ruiz, R. A., Dodds, P.A. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. Agron. J. 87, 29-33.
- Papucci, S.; González, A.; Cruciani, M.; Tuttolomondo, G.; González, M. 2016. Maíces tempranos versus tardíos. Cátedra de Sistemas de Cultivos Extensivos - Facultad de Ciencias Agrarias - UNR. Artículo de divulgación, Agromensajes 46: 39-45. ◀



# Generación de mapas de prescripción variable de nitrógeno utilizando imágenes de sensores remotos

Melchiori, Ricardo<sup>1</sup>; Melchiori, Arturo<sup>2</sup>, Albarenque, Susana<sup>1</sup>; Kemerer, Alejandra<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina

<sup>2</sup>Consultor Independiente, Biongeniero, Gualaguaychú, Entre Ríos, Argentina

<sup>3</sup>Facultad de ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Entre Ríos Argentina  
melchiori.ricardo@inta.gob.ar

## Introducción

La utilización de estrategias de manejo variable de fertilizantes ha sido tempranamente sugerida como una práctica que permite sincronizar la variabilidad de la oferta de nutrientes en el suelo con la demanda del cultivo en relación a su variabilidad espacial (Raun y Johnson, 1999). Así, la utilización de estas técnicas de Agricultura de Precisión contribuye a optimizar la productividad y minimizar el impacto ambiental (Pierce y Nowak, 1999; Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer 2004).

El uso de herramientas de sensoramiento remoto ha permitido desarrollar algoritmos para la prescripción variable de nitrógeno (N). Al respecto, existen distintas aproximaciones y propuestas recientemente comparadas (Raun et al., 2017), las que en general utilizan índices de vegetación simples para diagnosticar el estado nitrogenado de las plantas, y a partir de esto proponer recomendaciones de fertilización. Aunque estas aproximaciones están disponibles, su utilización no demuestra resultados concluyentes en cuanto al beneficio económico (Scharf et al., 2011) dado que la respuesta a la fertilización en cultivos no solo depende de la capacidad de diagnosticar la deficiencia, sino también de las condiciones ambientales que afectan el rendimiento del cultivo y la respuesta a la fertilización.

Existen metodologías, como la desarrollada por Raun et al. (2005), que proponen no solo diagnosticar las necesidades de re-fertilización, sino además estimar la respuesta esperada y las dosis. En este sentido, este tipo de modelo fue utilizado y localmente se desarrollaron parámetros para su implementación en trigo (Melchiori et al., 2007) y maíz (Melchiori et al., 2006) en Argentina. Los resultados de su utilización han sido evaluados y demostrados a escala de experimentación en parcelas, así como también en pruebas realizadas a nivel de lotes comerciales con equipos montados en aplicadores autopropulsados (Melchiori et al., 2009). No obstante, debe señalarse

que, aunque este tipo de equipos ha estado disponible en Argentina desde hace más de 10 años, la adopción del uso de los mismos para la prescripción variable de N en tiempo real no ha prosperado (Melchiori et al., 2013). Diversas cuestiones condicionan la adopción. Por un lado, puede considerarse el alto costo de los equipos, así como el largo tiempo de repago de la inversión dado el escaso retorno de este tipo de técnica, como sugieren Scharf et al. (2011) y Colaço y Bramley (2018). Por otro lado, la escasa magnitud de las dosis de fertilización utilizadas en Argentina que relativizan los efectos posibles de ganancia del manejo sitio específico por vía de la mejor eficiencia de uso del N.

En este contexto, resulta relevante generar herramientas conceptualmente sólidas, de resolución práctica y económica. En este sentido, en los últimos años se evidencia un rápido surgimiento de plataformas Web que permiten acceder a imágenes y al monitoreo remoto de cultivos (Melchiori et al., 2018). Asimismo, algunas de estas herramientas proponen alternativas para la generación de prescripciones de fertilización, aunque no se reportan ni se describen los métodos que se aplican. En algunos casos, las plataformas solo proponen alternativas para distribuir espacialmente los fertilizantes sin una estimación de la dosis de fertilización.

Trabajos recientes desarrollados por Melchiori et al. (2016) han considerado y propuesto la integración de las virtudes de las distintas metodologías de recomendación de N disponibles (Raun et al., 2005, 2011; Mullen et al., 2003; Johnson y Raun, 2003; Franzen et al., 2016; Holland y Schepers, 2013). Estos avances, junto con el manejo adecuado de los conceptos básicos de los métodos de diagnóstico de N, y su desarrollo sobre la base de plataformas que facilitan el acceso a imágenes satelitales de alta calidad, adecuada resolución espacial, y libre disponibilidad, generan amplias oportunidades para desarrollar e impulsar la adopción de herramientas para el

manejo sitio específico de N.

En relación a lo planteado, en este trabajo se propone, desarrolla y demuestra el funcionamiento de un sistema de prescripción variable de N basado en el uso de imágenes de índices de vegetación. El procedimiento es aplicable a la información proveniente de satélites, aviones o sistemas no tripulados equipados con sensores multiespectrales. El objetivo de este trabajo es describir el sistema de prescripción variable en el cultivo de trigo.

## Descripción de la propuesta

El sistema propuesto sintetiza el conocimiento adquirido y desarrollado en el uso de sensores remotos activos para el diagnóstico de fertilización nitrogenada en trigo y maíz por el equipo de Agricultura de Precisión de la EEA Paraná del INTA, junto con la consideración del estado del arte en la temática recientemente relevado por Franzen et al. (2016).

## Modelos de recomendación

El modelo de recomendación empleado se basa en dos principios fundamentales, el primero que la demanda de N de un cultivo depende del rendimiento alcanzable (Meissinger et al., 1994; Raun et al., 2005), y el segundo que la respuesta a la fertilización es independiente del rendimiento (Raun et al., 2011). Numerosos estudios demuestran que tanto el rendimiento como el índice de respuesta pueden estimarse a partir de índices de vegetación obtenidos a media estación de crecimiento del cultivo (Franzen et al., 2016). Adicionalmente, se han logrado evidencias que demuestran que la predicción de la respuesta a la fertilización puede estimarse a partir de valores de índices de vegetación de referencia generados desde la variabilidad natural medida en lotes de producción como proponen Holland y Schepers (2013). De manera general, lo descripto permite desarrollar una propuesta principalmente basada en ideas de Raun et al. (2005), pero con ecuaciones ajustadas localmente (Melchiori et al., 2007), e integrando modificaciones desde Holland y Schepers (2013). Para esto, se desarrollaron experimentaciones en la EEA Paraná del INTA, desde 2004 al presente, que permitieron generar parámetros locales para las ecuaciones requeridas, así como información y criterios que permiten diferir las fertilizaciones a los estadios

requeridos para la utilización de sensores, como el inicio de encañazón en trigo (1er y 2do nudo visible) y estadios de 8 a 12 hojas desplegadas en maíz.

## Descripción del sistema de adquisición y procesamiento de imágenes

La libre disponibilidad de imágenes de sensores remotos satelitales de diferentes resoluciones espaciales y temporales a través de interfaces de comunicación máquina a máquina, permiten la automatización de los procesos de búsqueda y descarga de imágenes, facilitando el procesamiento de diferentes áreas de interés.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) publica una aplicación de programación de interfaces (API) para la comunicación con servidores de imágenes en diferentes resoluciones espaciales, temporales y espectrales (USGS EROS, 2018). El catálogo disponible en los servidores Earth Explorer o Glovis, está habilitado para la consulta y descarga en modo automático lo que permite disponer en tiempo real de datos de Landsat-8 OLI Colección 1 y algunos datos Sentinel-2A y 2B. Las imágenes Landsat-8 OLI tienen una resolución espacial de 30 metros y un período de revisita máximo de 16 días en cualquier lugar de la tierra (Roy et al., 2014). Del mismo modo, la Agencia Espacial Europea ESA pone a disponibilidad los datos de sensores de la constelación Sentinel-2 (Drusch et al., 2012; **ESA Copernicus Open API, 2018**). Las imágenes Sentinel-2 tienen resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 metros dependiendo de la banda espectral en consideración con una resolución temporal de 5 días en cualquier lugar de la tierra (Gatti et al., 2018).

La consideración del uso combinado de los tres sensores, Landsat-8 OLI y los Sentinel-2 A y B, permite alcanzar una resolución temporal de 3 días, lo que permite disponer de una serie temporal relativamente densa de imágenes en la resolución espacio-temporal adecuada para el trabajo agronómico de monitoreo durante el crecimiento de los cultivos. Adicionalmente, ha sido demostrada la similitud entre las imágenes de ambas misiones lo cual habilita el uso combinado de las mismas para lograr los incrementos mencionados en la revisita (Li y Roy, 2017).

Tanto el USGS como la ESA permiten el acceso mediante el registro libre, aunque la descarga de imágenes de los servidores de USGS en forma

autónoma, requiere de un permiso especial liberado por parte de los administradores del sistema. Ambas interfaces de comunicación con los servidores de imágenes, permiten al usuario indicar el área de interés y un período de fechas para la búsqueda de imágenes, además del nivel de cobertura de nubes admitido. De este modo, es posible seleccionar imágenes en forma óptima para alcanzar requisitos de proximidad temporal a la fecha de interés, para el monitoreo y la generación del mapa de prescripción (**Figura 1**).

En ambos casos se utilizan las imágenes en nivel de procesamiento L1. Esto es, datos de reflectancia de la imagen en tope de atmósfera o en el sensor (TOA), de las cuales se corta el área de interés. En base a estos datos es calculado el índice de vegetación NDVI con el objetivo de obtener el dato de entrada para el modelo de prescripción.

### Requisitos de funcionamiento

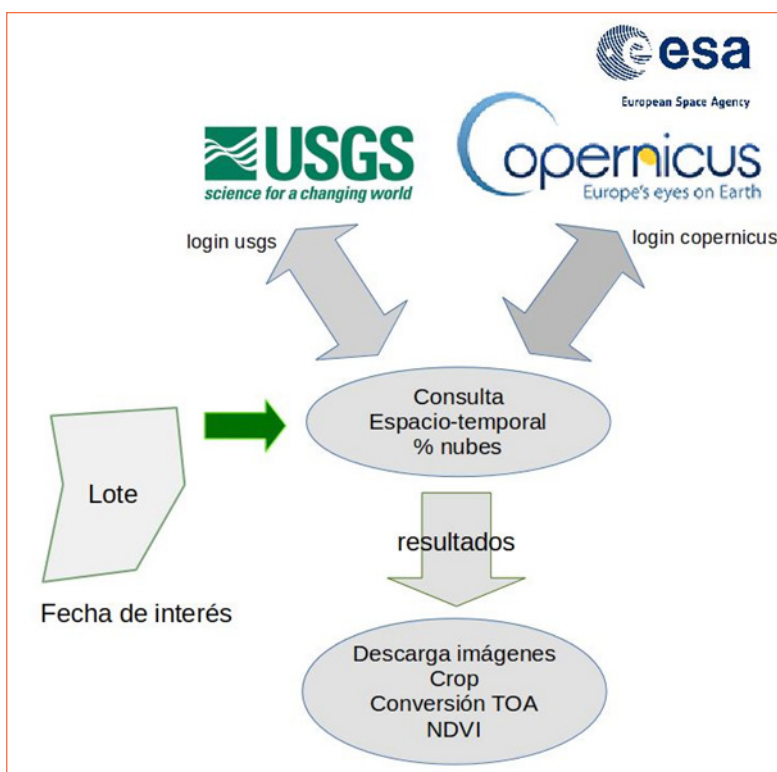
El sistema esta creado considerando que el usuario en una primera instancia selecciona el área de interés donde calcular la dosis de re-fertilización. Este procedimiento se realiza generando un polígono en formato KML o SHP a partir de la visualización del lote en cuestión sobre imágenes de Google Earth (**Figura 2a**). La selección del área de trabajo debe excluir zonas de interferencia en las imágenes como cañadas, árboles u otra vegetación que altere los valores de los índices de vegetación obtenidos en el cultivo de interés. Se debe especificar la fecha para la adquisición de las imágenes a utilizar como diagnóstico, esto es lo más cercano a los estadios sugeridos (i.e. fin de macollaje/ encañazón en trigo).

Respecto a los parámetros requeridos por el modelo de recomendación, el usuario debe especificar el rendimiento máximo alcanzable, esto es el rendimiento acorde al ambiente o lote en cuestión en condiciones de muy buena productividad. También se requiere especificar un valor de

eficiencia de uso del N del fertilizante esperada, así como también especificar el % de N del fertilizante nitrogenado a utilizar para que el resultado se exprese directamente en kg de fertilizante ha<sup>-1</sup>.

### Sistema de recomendación automatizado

El sistema desarrollado implementa los métodos para procesar las imágenes NDVI y generar el mapa de prescripción de fertilización nitrogenada correspondiente, considerando los requisitos de la maquinaria de aplicación disponible. Estos requisitos permiten obtener archivos de prescripción adecuados a las condiciones de trabajo de las máquinas de aplicación, como ser el ancho de trabajo del aplicador, tipo de fertilizante utilizado, número máximo de polígonos permitido por el controlador para variar la dosis de fertilizante y otras diferentes opciones de ajustes que puedan ser necesarias.



**Figura 1.** Un diagrama de flujo resumido del módulo de búsqueda, descarga y pre-procesamiento de imágenes Landsat-8 (login USGS) y Sentinel-2 (login COPENICUS). Selección del área de interés (lote) y fecha de interés según fenología de cultivo. Selección de imagen apropiada (resultados), y descarga.

## Resultados demostrativos del funcionamiento del método

La funcionalidad del modelo de recomendación para el cálculo de dosis de re-fertilización para trigo se está testeando a nivel de pruebas realizadas en lotes de producción comercial. Hasta el presente, se han realizado pruebas preliminares en 2016/17 en un lote de la EEA Paraná y en un campo de producción en el Departamento Diamante. En la campaña 2017/18, se continuaron las pruebas de ajuste en lotes en Paraná y en un campo de producción en Nogoyá (Entre Ríos).

En este reporte se presentan los resultados obtenidos para un lote localizado en el predio de la EEA Paraná del INTA. Las pruebas de campo se realizan sobre un lote que se fertilizó al voleo previo a la siembra con una mezcla física de fertilizante (10-46-0-9) en una dosis de 150 kg ha<sup>-1</sup>. El trigo (Klein Liebre) fue sembrado el 14 de junio con una dosis de 140 kg de semilla ha<sup>-1</sup>, se fertilizó con N al voleo el 6 de julio con una dosis de urea de 100 kg ha<sup>-1</sup> aplicada al estadio de 2-3 macollos, y se realizó el diagnóstico y re-fertilización variable con N aplicando el algoritmo propuesto, al estadio de 1-2 nudos visibles el 7 de septiembre. La aplicación del N en dosis variable se realizó con una fertilizadora de arrastre con distribución neumática Altina, modelo HP 3014, equipada con un equipo de dosificación variable Agrotax 9500 AGP.

Se seleccionó el lote a re-fertilizar a través de dos polígonos que se generaron en Google Earth de manera separada para evitar el área correspondiente a una cañada que atraviesa el lote, evitando de esta manera que genere interferencia por los valores de índices de vegetación en dicho sector (**Figura 2a**). De los servidores de imágenes, se obtuvo la más cercana al estadio de aplicación, en este caso se dispuso de una imagen Sentinel 2B 20HQK correspondiente a la fecha del 4 de septiembre de 2018. A partir de esta, se calculó el NDVI (**Figura 2b**), y se generaron las estimaciones requeridas para la recomendación de re-fertilización con N.

En general los valores de NDVI observados en el canopeo del cultivo fueron elevados, con un valor promedio para el lote de 0.75 (**Tabla 1**), los valores más bajos se observaron en el área correspondiente a la cañada que atraviesa

el lote y en la zona de los bordes, valores que posteriormente fueron eliminados del mapa de prescripción.

La imagen de NDVI fue re-muestreada a una resolución acorde a los requerimientos del ancho de trabajo de la fertilizadora, en este caso a un tamaño de píxel de 28 m (2 veces el ancho de labor). Se aplicó el modelo para la estimación del rendimiento a partir de la imagen de NDVI (**Figura 3a**). Dado que los valores de NDVI fueron en general elevados, el rendimiento estimado también mostró el mismo comportamiento, con un valor promedio para el lote de 4076 kg ha<sup>-1</sup> y un máximo de 5127 kg ha<sup>-1</sup> (**Tabla 1**).

El valor de NDVI de referencia determinado en el procedimiento fue de 0.85, considerándose este, como equivalente a una situación de crecimiento del cultivo sin limitación de rendimiento, como se reporta en la bibliografía. A partir de este valor, se calculó el índice de respuesta esperada a la fertilización (IR) para las condiciones observadas del cultivo (**Figura 3b**). El valor del IR osciló entre 0.99 y 2.75 (**Tabla 1**). El rendimiento medio estimado con re-fertilización fue de 5699 kg ha<sup>-1</sup>, con una gran proporción del lote donde se estimó que el rendimiento alcanzaría los valores máximos definidos (**Figura 3c**).

El modelo propuesto considera la información de rendimientos y respuesta estimada a la re-fertilización junto con la concentración de N en grano de trigo para estimar la dosis de N a aplicar. La dosis de aplicación se ajusta según una eficiencia de uso del N esperada en cada lote en particular, y la dosis expresada como kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante, se calcula en relación al % de N de la fuente de fertilizante utilizada. Por último, el sistema convierte la imagen (raster) a un vector de polígonos para ser empleado como archivo de prescripción (extensión SHP), utilizable en la generalidad de equipos de fertilización variable (**Figura 4**).

Los resultados obtenidos, demuestran la funcionalidad del sistema en un tiempo de procesamiento acorde a lo requerido para la toma de decisión de re-fertilizaciones en cultivos de trigo a media estación de crecimiento. Actualmente se está trabajando en la evaluación del funcionamiento del sistema en distintos ambientes, a la vez que se estudian factores que pueden contribuir a mejorar las prescripciones, como ser



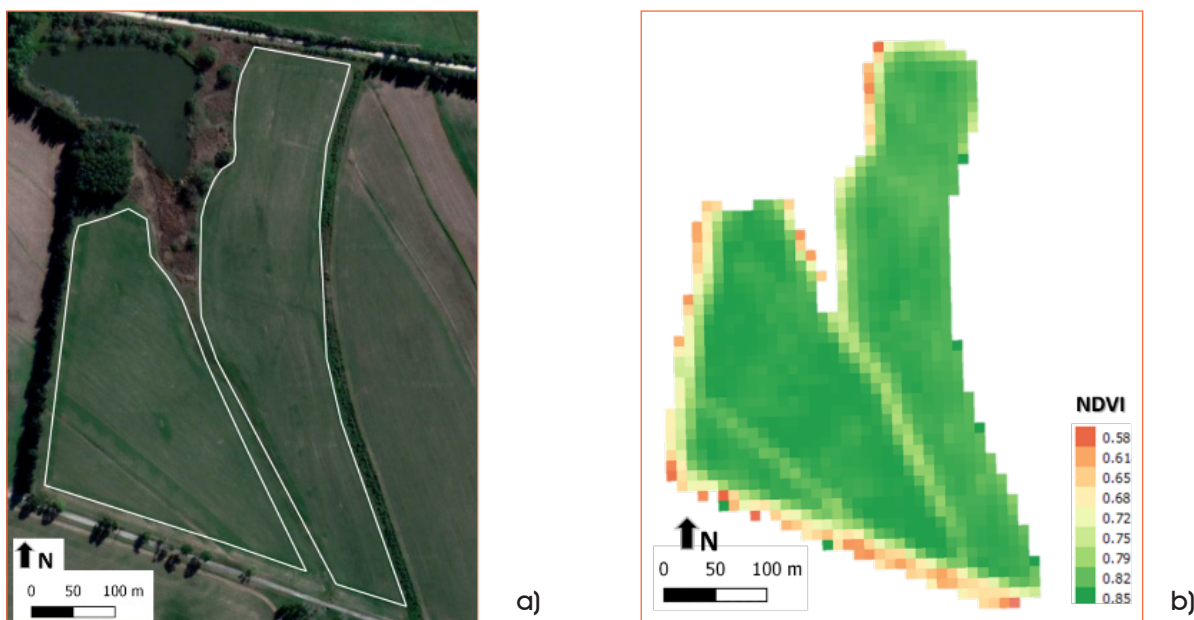
la consideración de imágenes de distinto origen y con distintos niveles de corrección. Asimismo, se están comparando diferentes ecuaciones disponibles para explorar el grado de ajuste de las estimaciones en ambientes de distinta productividad.

Por otra parte, se dispone también de procedimientos e información para las ecuaciones requeridas en la aplicación de este tipo de sistema en el cultivo de maíz, y otros cereales o cultivos industriales que requieran la utilización de fertilización nitrogenada (e.g. caña de azúcar). Los resultados de la implementación de esta propuesta, tienen como finalidad contribuir a un uso más eficiente y racional del N del fertilizante. Finalmente, se espera generar además la imple-

mentación de este modelo en distintas plataformas Web de gestión y administración de datos.

### Agradecimientos

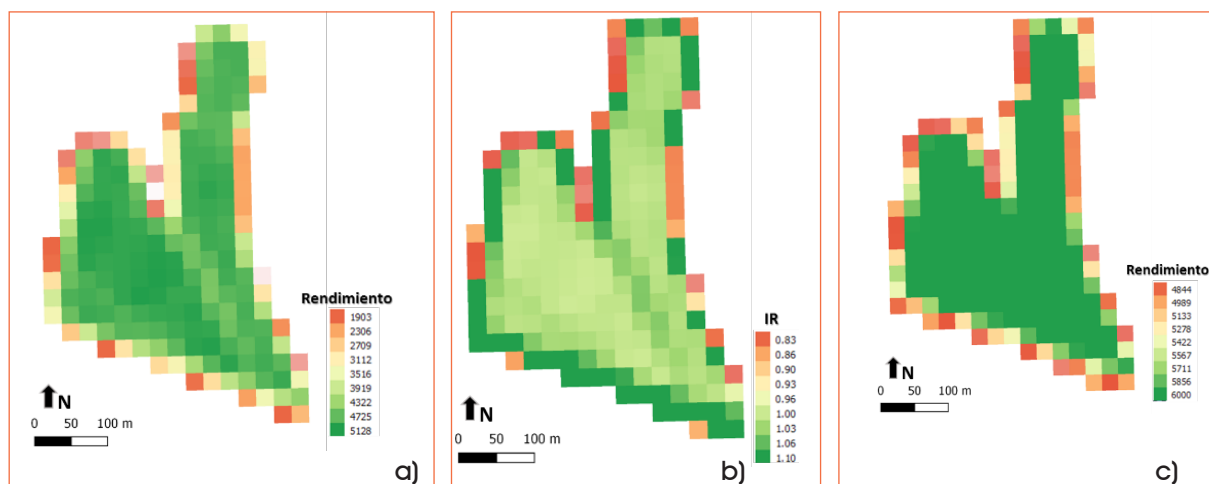
Al personal del Grupo de trabajo en Recursos Naturales y Factores Abióticos de la EEA Paraná, con quien se comparte el trabajo en el área experimental de la micro cuenca utilizada en la presente experiencia, y a la Asociación Cooperadora de la EEA Paraná del INTA que administra los lotes de producción comercial. Este trabajo fue parcialmente financiado con fondos del proyecto PNAlyAV-1130023: "Tecnologías de agricultura de precisión para mejorar la eficiencia de la producción agropecuaria" de INTA.



**Figura 2.** a) Selección del área de interés en base a Google Earth b) imagen de NDVI del cultivo de trigo en el estadio de encañazón (1-2 nudos visibles) obtenida a partir de imagen Sentinel 2B para el área de interés.

**Tabla 1.** Valores calculados y estimados mediante un sistema de prescripción automática de re-fertilización: Índice de vegetación (NDVI), rendimiento estimado de trigo sin re fertilización, estimación referencia virtual para percentil de 95%, estimación del rendimiento con re-fertilización ( $Y_N$ ), y dosis de N prescripta.

Estimaciones y cálculos	Promedio	Mínimo	Máximo
NDVI	0.75	0.31	0.86
Y0	4076	1216	5127
Referencia virtual (P95%)	0.85		
IR	1.22	0.99	2.76
YN	5699	4775	6000
Dosis de N estimada	110	59	258



**Figura 3.** a) Rendimiento estimado sin re-fertilización ( $Y_0$ ) a partir de la imagen de NDVI; b) índice de respuesta calculado a partir de valores de NDVI de referencia; c) rendimiento estimado con re-fertilización ( $Y_N$ ) en base al modelo considerando el rendimiento ( $Y_0$ ) y el índice de respuesta (IR).



**Figura 4.** Mapa de prescripción variable para re-fertilización nitrogenada en trigo, EEA Paraná del INTA. (2018)

## Bibliografía

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer J. 2004. Precision agriculture and sustainability. *Precision agriculture*, 5(4), 359-387.

Colaço, A. F., & Bramley, R. G. V. 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218, 126-140.

Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez

V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment*, Volume 120, 2012, Pages 25-36, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

ESA Copernicus Open API. <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/APIHubDescription>. Acceso en Mayo de 2018.

Franzen, D., Kitchen, N., Holland, K., Schepers, J., & Raun, W. 2016. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. *Agronomy Journal*, 108(5), 1775-1781.

Gatti A., Gallopo A. Castellani C., Carriero F. Sentinel-2 Products Specification Document. (2018). Issue 14.5.

Holland, K.H.; Schepers, J.S. 2013. Use of a virtual-reference concept to interpret active crop canopy sensor data. *Precision Agriculture*. 14(1), 71-85. DOI: 10.1007/s11119-012-9301-6

Johnson, G. V., & Raun, W. R. 2003. Nitrogen response index as a guide to fertilizer management. *Journal of plant Nutrition*, 26(2), 249-262.

Li, J.; Roy, D.P. 2017. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. *Remote Sensing*. 9, 902.

Meisinger, J.J. 1984. Evaluating plant-available nitrogen in soil crops system. In: *Nitrogen in crop production*. Hauck R.D. (Ed). Soil Science Society of America. USA

Melchiori, R. J., Caviglia, O. P., Bianchini, A. A., Faccendini, N., & Raun, W. 2006. Use of Sensor Based Nitrogen Rates to Improve Maize Nitrogen Use Efficiency in the Northern Argentinean Pampas.

Melchiori, R. J. M., Caviglia, O. P., Faccendini, N., & Albarenque, S. M. 2007. Utilización de sensores remotos para manejo de nitrógeno en trigo. EEA Paraná Serie de Extensión N 42. Actualización Técnica Cultivos de

Invierno. ISSN 0325-8874. P 32, 37.

Melchiori, R.J.M.; Caviglia, O.P.; & Albarenque, S.M. 2009. Manejo sitio-específico del nitrógeno en el cultivo de trigo basado en sensores remotos. En: Jornada Nacional de Agricultura de Precisión, integrando tecnologías para una agricultura sustentable. Eds: Melchiori, R.J.M.; Caviglia, O.P.; & Albarenque, S.M.; & Kemerer, A.C. ISBN 978-987-1623-21-1

Melchiori, R. J. M., Albarenque, S. M., & Kemerer, A. C. 2013. Uso, adopción y limitaciones de la agricultura de precisión en Argentina. Curso Int. Agric. Precisión, 12, 07.

Melchiori, R.; Kemerer, A.; Casuccio, L.; Albarenque, S. 2016. Fotografías obtenidas por drones para la prescripción variable de nitrógeno en trigo. XVII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica SELPER.

Melchiori, R. J. M., Albarenque, S. M., & Kemerer, A. C. 2018. Evolución y cambios en la adopción de la agricultura de precisión en Argentina. Curso Int. Agric. Precisión, 17, 03.

Mullen, R. W., Freeman, K. W., Raun, W. R., Johnson, G. V., Stone, M. L., & Solie, J. B. 2003. Identifying an in-season response index and the potential to increase wheat yield with nitrogen. Agronomy Journal, 95(2), 347-351.

Pierce F. J. & Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. In: D. Spark (Ed) Advance in Agronomy 67, Academic Press. P 1-85.

Raun, W. R., & Johnson, G. V. 1999. Improving nitrogen

use efficiency for cereal production. Agronomy journal, 91(3), 357-363.

Raun, W. R., Solie, J. B., Stone, M. L., Martin, K. L., Freeman, K. W., Mullen, R. W., ... & Johnson, G. V. 2005. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 36(19-20), 2759-2781.

Raun, W. R., Solie, J. B., & Stone, M. L. 2011. Independence of yield potential and crop nitrogen response. Precision Agriculture, 12(4), 508-518.

Raun, W., Figueiredo, B., Dhillon, J., Fornah, A., Bushong, J., Zhang, H., & Taylor, R. 2017. Can yield goals be predicted? Agronomy Journal, 109(5), 2389-2395.

Roy D.P., Wulder M.A., Loveland T.R., Woodcock C.E., Allen R.G., Anderson M.C., Helder D., Irons J.R., Johnson D.M., Kennedy R., Scambos T.A., Schaaf C.B., Schott J.R., Sheng Y., Vermote E.F., Belward A.S., Bindschadler R., Cohen W.B., Gao F., Hipple J.D., Hostert P., Huntington J., Justice C.O., Kilic A., Kovalsky V., Lee Z.P., Lyburner L., Masek J.G., McCorkel J., Shuai Y., Trezza R., Vogelmann J., Wynne R.H., Zhu Z. 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research, Remote Sensing of Environment, Volume 145, Pages 154-172, ISSN 0034-4257

Scharf, P. C., Shannon, D. K., Palm, H. L., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Kitchen, N. R., ... & Oliveira, L. F. 2011. Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. Agronomy Journal, 103(6), 1683-1691. ◀

**Conocer más.  
Crecer mejor.**

8 y 9 de Mayo  
Metropolitano  
Rosario  
Argentina

**Simposio  
Fertilidad  
2019** Conocer más.  
Crecer mejor.

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

# Aportes al manejo sustentable del suelo y la nutrición del cultivo de caña de azúcar en Tucumán-Argentina

Juan I. Romero, Agustín Sanzano y Eduardo R. Romero

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán. Argentina  
jromero@eeaoc.org.ar

## Introducción

En Argentina, el cultivo de caña de azúcar ocupa aproximadamente 430.000 ha, distribuidas principalmente en el Noroeste Argentino (NOA): Tucumán, Salta y Jujuy. Tucumán es el principal productor de caña y de azúcar de Argentina, con una superficie cosechable de 273.460 ha (Fandos et al., 2018). Su área cañera se ubica en el subtrópico, con temperaturas que permiten el crecimiento del cultivo entre fines de agosto y abril (7 a 9 meses de crecimiento, según el año). Las precipitaciones varían entre 1500 a 700 mm anuales y decrecen de oeste a este. El régimen es monzónico, el invierno y primavera son secos mientras que el 60% de las precipitaciones se concentran en el verano, entre diciembre y marzo (período de gran crecimiento del cañaveral). Solamente el 25-30% de la caña de azúcar se cultiva con riego (Figueroa et al., 2009).

Durante los últimos años, la creciente necesidad de implementar sistemas agrícolas sustentables y amigables con el medio ambiente ha llevado a la eliminación de la quema como práctica asociada a su cosecha, lo que se conoce como cosecha de caña verde. Durante la misma se depositan sobre la superficie del suelo grandes cantidades de residuo agrícola de cosecha (RAC), que en Tucumán varía entre 7 a 16 t de materia seca ha<sup>-1</sup>, dependiendo de la variedad y del nivel productivo del cañaveral (Romero et al., 2009 b). Entre las diferentes alternativas para manejar el RAC, se destaca la conservación sobre el suelo como cobertura (*mulching*) en áreas de producción en secano y sin presencia de napa freática. En este sentido, se han realizado numerosos estudios que demuestran que la conservación del RAC sobre la superficie del suelo aporta materia orgánica y mejora la estabilidad estructural del suelo, favorece la conservación de la humedad, reduce la erosión y la temperatura del suelo en los primeros centímetros de profundidad, permite el reciclado de nutrientes y favorece la actividad y el desarrollo de la microflora benéfica del suelo (Digonzelli et al., 2011).

Un manejo responsable-sustentable de la fertilización de cualquier cultivo implica el agregado de aquel/llos nutrientes que limitan el crecimiento del mismo (fuente) en una determinada situación edafoclimática, en las cantidades mínimas necesarias (dosis) para alcanzar el rendimiento objetivo con la máxima eficiencia posible de uso del fertilizante (momento y ubicación), conservando la fertilidad del suelo y minimizando los impactos negativos en el agroecosistema. Para ajustar estas variables, es necesario el conocimiento del requerimiento nutricional del cultivo, la oferta de nutrientes de ese suelo, la dinámica de absorción de nutrientes del cultivo, la extracción de nutrientes del sistema que implica su cosecha y la estimación del balance nutricional en el lote (aporte de nutrientes mediante fertilización o enmienda vs extracción) para cuantificar el paulatino empobrecimiento del suelo y la potencial pérdida de su capacidad productiva.

Conocer los desbalances nutricionales es una prioridad a investigar para mejorar los rendimientos y la eficiencia en el uso de nutrientes en los sistemas productivos de caña de azúcar, al mismo tiempo que minimiza los costos de cultivo y los impactos en el medio ambiente (Leite, et al. 2016). A nivel local, sin embargo, la información es escasa sobre el requerimiento, partición y la extracción de nutrientes por la caña de azúcar.

Con el objetivo de aportar información no disponible a nivel local que contribuya a avanzar hacia un manejo más sustentable de suelos y la nutrición del cultivo de caña de azúcar en Tucumán, se estableció un experimento para caracterizar la dinámica de absorción, partición y la extracción de macronutrientes de la variedad LCP 85-384, la más plantada en esta provincia. En este trabajo en particular, se presentan los resultados de requerimiento, partición y extracción de nutrientes en condición de secano, y se estima el balance aparente de nutrientes en el lote de estudio.



## Materiales y métodos

El ensayo estuvo ubicado en el campo experimental de Overo Pozo (EEAOC), departamento Cruz Alta, Tucumán (Argentina) en un lote de la variedad LCP85-384 (cultivar que ocupa alrededor del 80% del área cañera tucumana) plantada en surcos anchos distanciados a 1,8 m ( $55,5 \text{ surcos ha}^{-1}$ ).

El suelo del sitio del ensayo es un Haplustol típico de textura franca y franco limosa en las profundidades de 0-30 y 30-60 cm, respectivamente. El contenido de materia orgánica en los 0-30 cm es 1,9%. El pH del suelo es neutro, no es salino ni presenta contenido de carbonatos que puedan afectar el cultivo.

Debido a que el contenido de P extractable se encontraba dentro del rango de respuesta probable a la fertilización ( $21,6 \text{ ppm}$  - Bray Kurtz II), se fertilizó todo el ensayo con superfosfato triple (0-46-0) aplicando  $42 \text{ kg de P ha}^{-1}$  para todo el ciclo productivo del cañaveral (normalmente 5 años), según la tabla de recomendación vigente (Alonso, et al., 2015).

Las precipitaciones durante las sucesivas campañas desde julio a junio del siguiente año fueron 487, 798, 830, 704 y 880 mm, para edades de caña planta, soca 1, 2, 3 y 4 respectivamente. La caña planta se regó con una lámina total de 213 mm para asegurar la buena implantación del cañaveral.

En la caña planta no se realizaron determinaciones de la concentración de nutrientes ni partición de biomasa.

A partir de la Soca 1, se establecieron en el cañaveral 5 parcelas de evaluación en un diseño totalmente aleatorizado. Cada parcela constó de seis surcos de 10 m de largo para la evaluación de la población de tallos y para la realización del muestreo destructivo en la cosecha destinado a determinar la producción anual, la biomasa aérea y su partición, así como la concentración de nutrientes en los diferentes órganos. En las socas 3 y 4 se evaluaron 3 parcelas o repeticiones.

Las 4 socas se fertilizaron en una sola aplicación dentro del período recomendado (octubre-noviembre).

La estimación del rendimiento cultural se realizó a partir del número de tallos molibles por metro lineal de surco (media de tres conteos de 10 m por réplica) y del peso fresco medio de los tallos a cosecha. Éste se obtuvo de una muestra de 20

tallos enteros consecutivos por réplica, la cual se separó en hojas verdes, hojas secas, tallo molible y despunte cuyos pesos se determinaron separadamente. Una submuestra de cada fracción fue secada en estufa ( $65^{\circ}\text{C}$ ) para la determinación de materia seca y del contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el Laboratorio de Suelos, y de calcio (Ca) y magnesio (Mg) en el Laboratorio de Química, ambos de la EEAOC.

El N se extrajo por digestión sulfúrica, y se determinó por digestión-destilación (Kjeldahl). Los demás nutrientes se extrajeron por calcinación y se determinaron los contenidos de P por colorimetría en cenizas totales, de K por fotometría en cenizas totales, y de Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica.

La cantidad de nutrientes absorbidos se cuantificó sumando el producto de la materia seca por el tenor de nutrientes de cada fracción de la biomasa aérea. Los valores de extracción de N, P, K, Ca y Mg presentados en este trabajo corresponden al promedio de las determinaciones efectuadas en las socas 1, 2, 3 y 4.

El balance de nutrientes se estimó como la diferencia entre la cantidad de nutrientes que ingresaron con la fertilización y las que salieron del sistema con las cosechas, durante los 4 años analizados. El aporte de los residuos del cultivo dentro del mismo lote, se consideran reciclaje de nutrientes y por eso no se incluyeron entre los ingresos.

Se efectuó un análisis estadístico de los datos utilizando el programa Infostat (Di Rienzo et al., 2016).

## Resultados y discusión

### Rendimientos

La producción media de las 4 socas en secano fue  $78,3 \text{ t ha}^{-1}$  ( $21,5 \text{ t M. Seca ha}^{-1}$ ). La producción acumulada en el ciclo económico del cañaveral (c. planta y 4 socas) fue de  $384,5 \text{ t ha}^{-1}$ . El índice de cosecha promedio del cultivo fue de 76,6% en peso verde y 67,3% en peso seco.

### Requerimiento y Extracción de Nutrientes

Los datos medios de requerimiento y extracción de nutrientes por hectárea y por tonelada producida se encuentran resumidos en las **Tablas 1 y 2**.

Las cantidades de nutrientes determinados en la parte aérea del cultivo al momento de la

cosecha (requerimiento), presentaron el siguiente orden:  $K > N > Ca > Mg > P$ .

De la **Tabla 1**, podemos observar que las cantidades extraídas del sistema por unidad de superficie se ordenaron de la siguiente manera:  $K > N > P > Ca \approx Mg$ . Estos valores son consistentes con los determinados por Mariano E. et al. (2016) en dos suelos del estado de San Pablo-Brasil.

En la **Tabla 2** puede observarse la fracción de la cantidad total de nutrientes presentes en la parte aérea de la planta que se particionó a los tallos molibiles y por lo tanto se extrajeron del sistema y la fracción que se recicló o permaneció en el lote en los residuos agrícolas de cosecha (RAC).

Leite et al. (2016), trabajando con 3 variedades en 3 sitios a la edad de soca 1, diferentes en Brasil, determinaron valores de IC de N, P y K de 46%, 57% y 52% respectivamente, evidenciando una tendencia similar a la de los resultados obtenidos en este estudio. La diferencia en magnitud entre los resultados obtenidos y los citados podría deberse a diferencias varietales, de época de cosecha y/o condiciones edafoclimáticas.

Podemos observar en la **Tabla 2**, que los nutrientes que el cultivo particionó al tallo en mayor proporción fueron el P y el K, seguidos por el N y el Mg y por último el Ca, del cual solamente el 26% del total contenido en la parte aérea se ubicó en el tallo.

## Balance aparente de nutrientes

El balance aparente de nutrientes, considerando las 4 socas evaluadas se presenta en la **Tabla 3**. El súper fosfato triple utilizado como fuente de P, posee además en su composición un 14% de Ca que debe considerarse. Las salidas se calcularon a partir de la producción acumulada y la extracción media por tonelada de rendimiento (peso seco) para cada nutriente.

El balance de N fue positivo al considerar las cuatro campañas, lo que significa que agregamos más nutriente del que se exportó en la cosecha, lo que implicaría un aumento en la reserva de dicho nutriente en el suelo si dicho elemento presentara residualidad. Sin embargo, el N es un nutriente móvil en el suelo y de muy escaso efecto residual, y que está sometido a pérdidas por lixiviación desnitrificación y volatilización, de magnitudes variables según las características edafoclimáticas y la combinación de fuente, dosis, momento y localización del fertilizante seleccionada.

Una parte de esos  $+49 \text{ kg N ha}^{-1}$  del mismo que no fue exportada en el tallo, probablemente formaba parte de otros órganos del cultivo (**Tabla 2**: el 47% del total de N absorbido se encontró en otros órganos) y adquirió cierta residualidad como constituyente del residuo agronómico de cosecha (RAC), que queda en el lote cuando no es eliminado mediante alguna práctica como la

**Tabla 1.** Requerimiento y extracción promedio de nutrientes de la variedad LCP 85-384 en secano en O. Pozo, Tucumán. Expresado en kg de nutriente absorbido/extraído por hectárea y por tonelada de cana cosechada (expresado en peso seco y peso fresco). Valores promedio de determinaciones en tallos molibiles de las socas 1, 2, 3 y 4.

Unidades	Requerimiento					Extracción				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
$\text{kg ha}^{-1}$	143,29	16,96	294,32	31,53	18,05	76,04	11,14	179,71	8,05	8,21
$\text{kg t}^{-1}$ ; P.Seco	6,80	0,79	13,69	1,48	0,84	3,61	0,51	8,29	0,38	0,38
$\text{kg t}^{-1}$ ; P.Fresco	1,84	0,22	3,74	0,40	0,23	0,97	0,14	2,27	0,10	0,10

Letras diferentes indican diferencias significativas (Fisher  $< 0,05$ ) entre tratamientos.

**Tabla 2.** Valores medios y error estándar de los datos de requerimientos y extracción de nutrientes ( $\text{Kg t}^{-1}$  P. Seco). Las 16 repeticiones mencionadas corresponden a las 5 repeticiones evaluadas en cada una de las primeras dos campañas (socas 1 y 2) más las 3 repeticiones evaluadas durante las socas 3 y 4.

n= 16	Requerimiento ( $\text{kg t}^{-1}$ ; P. Seco)					Extracción ( $\text{kg t}^{-1}$ ; P. Seco)				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Media	6,8	0,79	13,69	1,48	0,84	3,61	0,51	8,29	0,38	0,38
E.E.	0,49	0,01	0,43	0,12	0,03	0,34	0,01	0,45	0,04	0,01

quema o el enfardado. Sin embargo, debemos destacar que la caña de azúcar en general presenta una baja eficiencia de uso del N del fertilizante. Vallis et al. (1996), trabajando con  $^{15}\text{N}$ , determinó que la urea proveyó solo el 20-40% del N absorbido por la caña en una campaña, por lo que se presume que la mitad o más del N absorbido por la caña de azúcar es provista por la mineralización de la materia orgánica del suelo (Vallis y Keating, 1996). Esto significa que una gran parte del fertilizante aplicado no es absorbida por el cultivo por diferentes motivos y esa fracción del N agregado no absorbida por el cultivo puede perderse del sistema, aún cuando el balance de N diera negativo. A pesar de la baja eficiencia de la práctica, el N del fertilizante juega un rol clave en los estadios fenológicos iniciales del cañaveral, constituyendo del 40-70% del N total acumulado previo al período de gran crecimiento en la biomasa aérea de la caña de azúcar. Luego, su concentración se diluye y a cosecha representa del 10% al 35% del N contenido en la parte aérea del cultivo (Franco et al., 2010).

En ese trabajo se determinó que la parte aérea del cañaveral al momento de cosecha contenía  $143 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . Si consideramos los valores de eficiencia en el uso del N del fertilizante determinados por Vallis (1996), estimamos que la caña, tomó  $18\text{-}36 \text{ kg ha}^{-1}$  de N de la urea aplicada y  $107 \text{ a } 125 \text{ kg N ha}^{-1}$  provinieron del "suelo" (materia orgánica, RAC de campañas anteriores y la fijación biológica de N).

Respecto al aporte de N para el cultivo proveniente de la mineralización de los residuos de cosecha (RAC), numerosas investigaciones detectaron que solo el 3 al 15% de N contenido en el RAC es absorbido por la caña de azúcar en el ciclo siguiente (Gava et al., 2003; Fortes et al., 2013.)

En este trabajo se determinó que en el RAC regresan al sistema anualmente  $67 \text{ kg N ha}^{-1}$  (47% del requerimiento). Si consideramos, en función de los datos de la bibliografía citada, que el 5-15% de ese N es absorbido por el cultivo

en el ciclo posterior a la cosecha, el RAC estaría proveyendo de  $3 \text{ a } 10 \text{ kg N ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  al cultivo.

El aporte del fertilizante debería ser solamente el necesario para abastecer al cultivo durante los primeros meses de crecimiento (primavera seca) cuando todavía el aporte del suelo es deficitario. Dosificaciones superiores podrían derivar en pérdidas significativas de N por lixiviación o por volatilización y una menor eficiencia agronómica de la fertilización.

Los balances de N como el aquí calculado, presentan limitaciones como herramienta para la toma de decisiones en el manejo de la fertilización. No tienen en cuenta el escaso aprovechamiento del fertilizante por el cultivo y la baja residualidad en el suelo del producto no absorbido, sobreestimando las "entradas" o subestimando las "salidas" al no considerar ni cuantificar las pérdidas citadas. Deben realizarse esfuerzos tendientes a incrementar la eficiencia en el uso del N del fertilizante en estas primeras etapas del cultivo y así disminuir las pérdidas al ambiente y las dosis requeridas.

En el caso del P, nutriente poco móvil y residual en el suelo, un balance positivo significa un enriquecimiento o reconstrucción progresiva de la reserva del suelo. Sin embargo, recordemos que la dosis que se agregó de SFT de acuerdo a las recomendaciones en vigencia, supone ser suficiente para 5 cosechas y puede observarse que ya en 4 años sucesivos el balance es ligeramente negativo, y si estimáramos una extracción similar para la caña planta, la magnitud del déficit sería prácticamente igual a la extracción de P promedio para una soca. Si quisiéramos mantener los niveles de P en el suelo, la dosis (criterio de reposición) debería ser un 20% superior a la recomendación actual (criterio de suficiencia),  $25 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$  en lugar de  $20 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ , al menos para niveles productivos similares o superiores a los alcanzados en esta experiencia.

Los balances de K, Ca y Mg son negativos ya que no son elementos usualmente agregados mediante fertilización al no ser normalmente

**Tabla 3.** Balance de nutrientes en caña de azúcar en secano para el periodo soca 1-4, var. LCP 85-384 en Finca Overo Pozo, Tucumán.

	N	P	K	Ca	Mg
ENTRADAS (kg ha <sup>-1</sup> )	360	42,17	0	13,6	0
SALIDAS (kg ha <sup>-1</sup> )	311,1	43,9	714,4	32,7	32,7
Balance Ap (kg ha <sup>-1</sup> )	+48,9	-1,8	-714,4	-19,1	-32,7

limitantes de los rendimientos de la caña en Tucumán. El ingreso de Ca al sistema se debe a que la fuente de P seleccionada cuenta con Ca en su composición. El balance de K es el más negativo en ambos tratamientos y es el nutriente normalmente absorbido en mayores cantidades por la caña de azúcar. La predominancia de la arcilla "illita", rica en K, en los suelos de Tucumán hace que la fertilización potásica no sea una práctica habitual debido a los altos niveles de disponibilidad del nutriente. Sin embargo, en algunos suelos con texturas gruesas de la zona pedemontana, los contenidos de K intercambiables pueden resultar críticos (Romero et al., 2009a). En estos casos, repetidos balances negativos de K, luego de décadas de producción de caña de azúcar sin fertilización, podrían causar en algún momento una disminución progresiva de la capacidad productiva de dichos lotes.

### Reciclaje de nutrientes

Es muy importante remarcar que estos datos de extracción y los balances calculados provienen de cañaverales donde se practicó la cosecha en verde (sin quema), y se mantuvo en el suelo todo el RAC (hojas y fracción de tallos inmaduros).

El RAC, que para las condiciones de Tucumán ha sido estimada entre 7 t y 16 t de materia seca  $\text{ha}^{-1}$  (Romero et al., 2009b), puede quedar esparcido sobre el campo como cobertura, ser incorporado en los primeros centímetros del perfil o retirarse total o parcialmente utilizando máquinas enfardadoras (para alimentación animal u aprovechamiento energético). Información derivada del presente estudio, señala que el RAC de la var. LCP 85-384 en secano representó 10,7 t  $\text{ha}^{-1}$  de materia seca. En la **Tabla 2** se destaca la proporción de nutrientes que se encuentran en el RAC y volverán al suelo si se practica cosecha en verde y no se eliminan estos residuos (por quema u extracción del mismo).

Además, mantener los residuos de la cosecha sobre el suelo produce otros efectos benéficos: aumenta el contenido de materia orgánica y la estabilidad estructural del suelo, favorece la conservación de la humedad edáfica, reduce la erosión, disminuye la temperatura del suelo en los primeros centímetros de profundidad, aumenta la población de microorganismos benéficos, disminuye la infestación de malezas, y permite reducir las labores culturales, entre otros (Digonzelli et al. 2011).

Más del 70% de la materia orgánica y los nutrientes contenidos en la maloja de la caña (hojas y despuntes) son emitidos a la atmósfera por la quema asociada a la cosecha (Mitchell et al., 2000). Por lo tanto, dejar la maloja sobre la superficie del suelo luego de la cosecha, sin quemar, representa además de los beneficios citados, una entrada de carbono orgánico y un reciclaje de nutrientes al sistema suelo-planta, el cual puede resultar en beneficios al largo plazo en la sustentabilidad (secuestro de carbono) y el manejo nutricional (disminuyendo la necesidad de fertilizantes) de los sistemas cañeros (Trivelin et al., 2013).

### Conclusiones

- La variedad LCP 85-384 en secano, para alcanzar un rendimiento promedio de 78 t  $\text{ha}^{-1}$  requirió 143, 17, 294, 32 y 18 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.
- La extracción de nutrientes fue de 76, 11, 178, 8, y 8 kg  $\text{ha}^{-1}$  de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.
- Los balances de nutrientes estimados para el período de 4 años evaluado fueron negativos para P, K, Ca y Mg.
- La dosis actualmente recomendada de fertilización fosfatada para la situación analizada, no fue suficiente para compensar la extracción de dicho nutriente por el cultivar LCP 85-384.
- La eliminación total o parcial del RAC significa una importante pérdida de nutrientes del lote que debe ser considerada en el balance.
- El conocimiento de los requerimientos y las extracciones de las diferentes variedades de caña de azúcar utilizadas en la región y los balances de nutrientes son un paso importante en el avance hacia una nutrición balanceada y una producción de caña más sustentable, que permita mantener o incrementar la producción con una mayor eficiencia en el uso de los recursos y manteniendo la fertilidad de los suelos.



## Bibliografía

- Alonso, L., E.R. Romero, F. Leggio, L. Tórtora, P. Fernández González, N. Grellet, L. Vera y J. López Guzmán. 2015. En "Fertilización de la caña de azúcar". Editores: Digonzelli, P., E.R. Romero y J. Scandaliaris; Guía Técnica del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán, Argentina. Volumen 1: 187-197.
- Digonzelli P., E.R. Romero, J. Tonatto, J. Fernández de Ullivarri, J. Giardina, L. Alonso y H. Rojas Quinteros. 2011. Dinámica de la descomposición del residuo de la cosecha en verde de la caña de azúcar (RAC). *Revista Avance Agroindustrial* 32 (2): 20-24.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fandos, C., Scandaliaris, J., Scandaliaris, P., Carreras Baldrés, J. I., Soria; F. J.; Giardina, J. y Romero, E. R. 2018. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2018 en Tucumán. Reporte Agroindustrial n° 148, EEAOC.
- Figuerola, R.L.; E.R. Romero y G.S. Fadda. 2009. El riego de la caña de azúcar. En Romero, E.R.; P.A. Digonzelli y J. Scandaliaris (eds.), Manual del Cañero, 1° ed. EEAOC, Tucumán, R. Argentina, pp. 101-120.
- Fortes, C.; Vitti, A.C.; Otto, R.; Ferreira, D.A.; Franco, H. C. J. y Trivelin, P.C.O. 2013. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. *Scientia Agrícola* 70: 305-312.
- Franco, H.C.J., P.C.O. Trivelin, R. Otto, C.E. Faroni, A.C. Vitti y E.C.A. Oliveira. 2010. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* Vol. 27.
- Gava, G.J.C., P.C.O. Trivelin, A.C. Vitti, y M. W. Oliveira. 2003. Recovery of nitrogen (15N) from urea and cane trash by sugar cane ratoon (*Saccharum* spp.). *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 27: 621-630.
- Leite, J.M., I.A. Ciampitti, E. Mariano, M. Vieira-Megda y P. Trivelin. 2016. Nutrient Partitioning and Stoichiometry in Unburnt Sugarcane Ratoon at Varying Yield Levels. *Frontiers in Plant Science*. Volume 7. Article 466 ([www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)).
- Mariano, E., J. Leite, M. Vieira-Megda, I. Ciampitti, A. Vitti, C. Faroni, H. Franco, C. Trivelin. 2016. Biomass and nutrient content by sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. *Crop Science*, Vol. 56, May-June 2016, pag 1234-1244.
- Mitchell, R.D.J., P.J. Thorburn y P. Larsen. Quantifying the loss of nutrients from the immediate area when sugarcane residues are burnt. *Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 2000; 22:206-11.
- Romero, E.R., L. Alonzo, S. Casen, M.F. Leggio, J. Tonatto, J. Scandaliaris, P. Digonzelli, J. Giardina y J. Fernandez de Ullivarri. 2009a. En Fertilización de la caña de azúcar. Editores: Romero, E.R.; Digonzelli, P. y Scandaliaris, J. Manual del Cañero. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Tucumán, Argentina.
- Romero, E.R., J. Scandaliaris, P.A. Digonzelli, L.G. Alonso, F. Leggio, J.A. Giardina, S.D. Casen, M. J. Tonatto, y J. Fernández de Ullivarri. 2009b. Effect of variety and cane yield on sugarcane potential trash. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 86(1), 9-13.
- Stewart, W. M. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, N° 67. IPNI.
- Trivelin, P.C. O., H. C. J. Franco, R. Otto, D. A. Ferreira, A. C. Vitti, C. Fortes, C.E. Faroni, E.C.A. Oliveira, H. Cantarella. (2013) Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for Sao Paulo, Brazil. *Sci Agric. (Piracicaba, Braz.)* 70, 345-352. Doi: 10.1590/S010390162013000500009.
- Vallis, I., V.R. Catchpoole, R.M. Hughes, R.J.K. Myers, D.R. Ridge y K.L. Weier. 1996. Recovery in plants and soils of 15N applies as subsurface bands of urea to sugarcane. *Aust. J. Agric. Res.* 47(3) 355-370.
- Vallis I. y B.A. Keating. 1996. Uptake and loss of fertilizer and soil nitrogen in sugarcane crops. *Sugar cane* 2: 12-16. ◀

## Fertilización de eucalyptus utilizando balance nutricional

Nicolás Ignacio Stahringer<sup>1</sup>, Júlio César Lima Neves<sup>2</sup>, Humberto Carlos Dalurzo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias – UNNE, Corrientes- Argentina; <sup>2</sup> Dpto. de Suelos – UFV, Viçosa-Brasil.  
nicostahringer@hotmail.com

### Introducción

Argentina posee actualmente alrededor de 320 000 ha de plantaciones de eucalyptus, siendo que de ese total aproximadamente 120 000 ha se encuentran en Corrientes (Argentina, 2018). En dicha provincia, los bosques implantados se encuentran, en general, sobre suelos de baja fertilidad (Larocca et al., 2004; Aparicio et al., 2005).

La sustentabilidad de la producción forestal es un aspecto clave a ser considerado y para ello se debe mínimamente mantener la fertilidad de los suelos forestales. En este sentido, Goya et al. (2003) advierten que, en caso de realizarse prácticas de cosecha más extractivas de nutrientes, como retirada de toda la parte aérea de los árboles y/o quema de los residuos tras la cosecha, se alcanzarán niveles críticos de estabilidad para P y K en aproximadamente 2 rotaciones forestales sino se realizan aportes por fertilización. Cabe destacar que este estudio fue realizado en Misiones, en suelos rojos (Kandiúlfes). Estos suelos son similares a los de mayor índice de producción de Corrientes (Cruzate y Panigatti, 2008), resta entonces pensar en cuál es el panorama para los demás suelos forestales que son menos fértiles.

Para obtener elevadas productividades en plantaciones de eucalyptus, de manera sustentable, debe realizarse un adecuado manejo nutricional del cultivo, entre otros aspectos a tener en cuenta. Para ello, cuando el suministro de nutrientes por parte del suelo no es suficiente para cubrir la demanda de nutrientes de la plantación, los mismos deben ser adicionados vía fertilización. Dentro de esta realidad, debe considerarse que la demanda de nutrientes varía en función de la meta de productividad deseada.

Actualmente, empresas forestales brasileñas que representan una superficie total superior a 1 000 000 ha, utilizan un modelo de balance nutricional para calcular las dosis de fertilizantes que aplican. Dicho modelo ha sido desarrollado

y mejorado en el Departamento de Suelos de la Universidad Federal de Viçosa (Barros et al., 1995). Cabe destacar, que la utilización de esta tecnología ha contribuido de manera importante para aumentar la productividad promedio de eucalyptus en ese país de 15 a 45 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los últimos 30 años.

En este trabajo se presenta un modelo de balance nutricional que permite calcular dosis de fertilizantes para eucalyptus. El mismo fue calibrado junto a otros modelos nutricionales y ecofisiológicos para contribuir al desarrollo y a la sustentabilidad del Sector Forestal de Corrientes y de la Argentina (Stahringer, 2017).

### Materiales y métodos

#### Trabajo de campo y análisis de laboratorio

La investigación realizada para calibrar el modelo de balance nutricional para fertilización de eucalyptus, y los demás modelos citados en Stahringer (2017), requirió de una fase de trabajo de campo. La misma fue realizada durante 35 días ininterrumpidos recorriendo aproximadamente 5000 km de la Provincia de Corrientes. Las plantaciones de eucalyptus, muestreadas en el trabajo de campo se ubicaron en diversas regiones/empresas detalladas a continuación: centro-oeste y nordeste (Pomera Maderas) y sudeste (MASISA) (Figura 1). Cabe aclarar que se trabajó separadamente con individuos de *Eucalyptus grandis* originados a partir de semilla (EgS) y con *Eucalyptus grandis* propagados por estacas, que corresponde a materiales clonales (EgC), además de dos tipos de pinos.

En el trabajo de campo se realizaron muestreos de suelos, además de cubicación y muestreos de tejidos vegetales de árboles distribuidos en 31 sitios forestales, de los cuales 16 correspondieron a eucalyptus. Inicialmente se hizo una preselección en gabinete de los posibles sitios a muestrear en función de las características bus-

cadras para cada especie y región. Se trabajó siempre siguiendo cronosecuencias, con edades variando entre 10 meses y 16 años. A campo, se seleccionaron los mejores rodales de los que habían sido preseleccionados inicialmente. En los rodales seleccionados se midió el *cap* (circunferencia a 1.3 m de altura) en parcelas temporarias y en cada una de estas se identificó un árbol superior ( $\geq +s$ ), un árbol promedio ( $-s < < +s$ ) y un árbol inferior ( $\leq -s$ ). Una vez identificados los árboles, estos fueron apeados, se midió su altura, se retiraron discos de cada cuarto del fuste y se pesaron por separado todos los componentes (hojas, ramas y tronco) de cada árbol. A su vez, se tomaron muestras de hojas, ramas, madera, corteza y hojarasca para determinar materia seca y concentración de macro y micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn y B). Las muestras de suelo se tomaron hasta 1 m de profundidad (0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm) para realizar análisis físicos y químicos de rutina y se tomaron muestras sin disturbar para determinar la densidad aparente (0-20 y 20-40 cm). En total fueron recolectadas 1620 muestras de tejidos vegetales y 318 muestras de suelo.

### Base teórica del modelo de balance nutricional para *eucalyptus*

Para llegar a recomendaciones de fertilizantes fundamentadas, que contemplen la demanda de nutrientes del cultivo y el suministro de nutrientes del suelo, utilizamos un modelo basado en el balance nutricional entre estos componentes (Figura 2).

Para calcular la demanda nutricional del rodal se debe partir de una meta de productividad que se pretende alcanzar en un dado período de tiempo, expresada como incremento medio anual del tronco (en  $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ ) a una determinada edad ( $IMA_{tronco}$ ). Dicha meta puede ser establecida por el productor forestal a partir de su experiencia y de conocer el sitio forestal donde se va a establecer la plantación, o bien puede ser estimada utilizando el modelo ecofisiológico 3-PG (Landsberg y Waring, 1997), parametrizado para *Eucalyptus* y *Pinus* en Corrientes (Stahring, 2017). A partir de esta meta, y teniendo en cuenta la edad para la cual fue establecida, se calcula el volumen de madera a producir por hectárea. Al dividir ese volumen por el número de árboles en una hectárea se obtiene el volumen

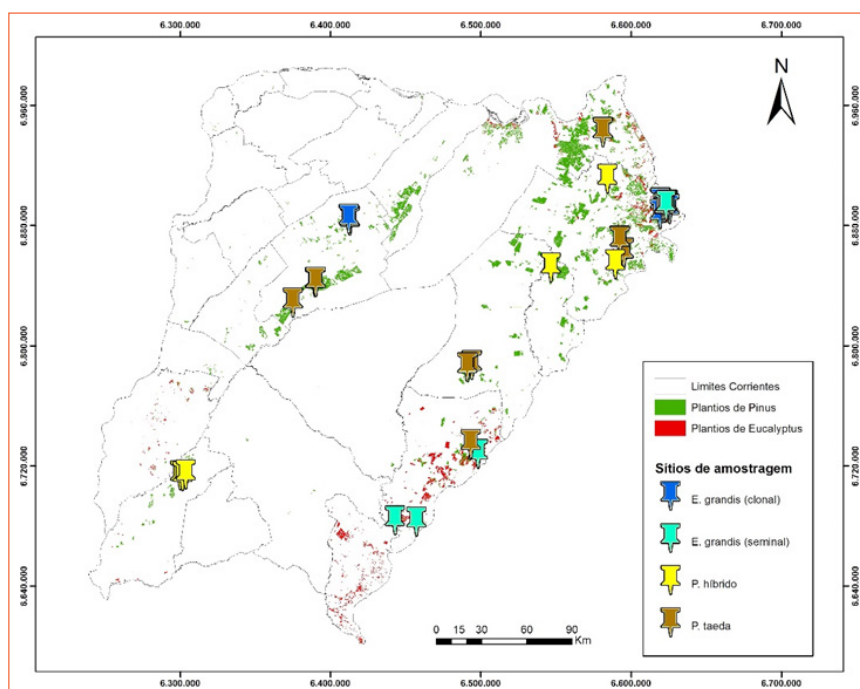


Figura 1. Mapa de Corrientes con la distribución de los bosques cultivados y la ubicación de los puntos de muestreo de *Eucalyptus grandis* (de semilla y clonal), *Pinus taeda* y Pino híbrido. Fuente: Adaptado de Elizondo (2015).

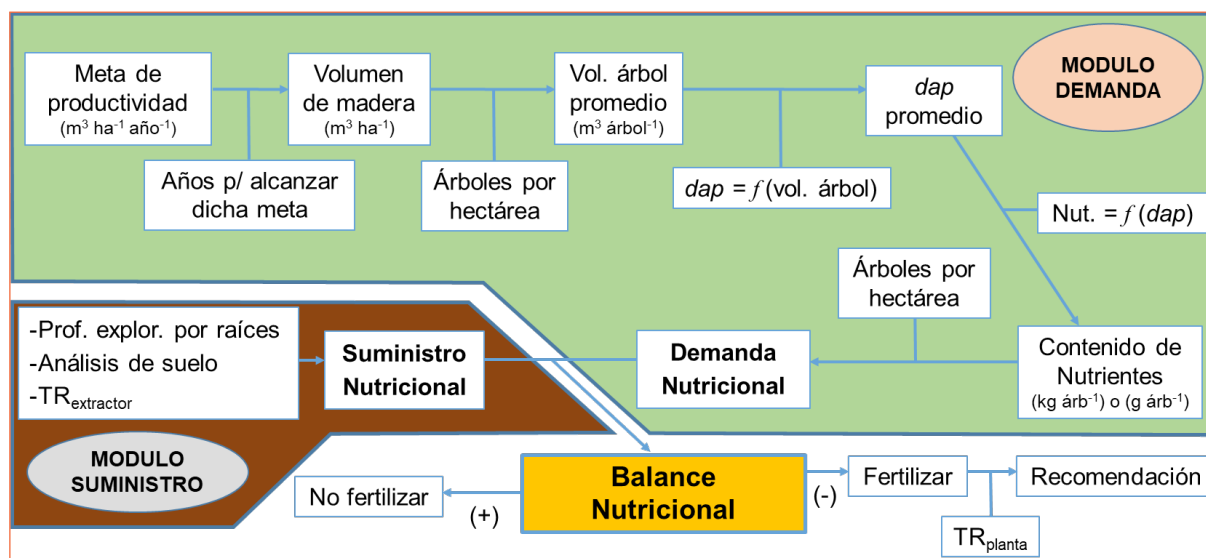
de un árbol promedio de la población, y, a partir de este se calcula su *dap* (diámetro a 1.3 m de altura). Dicho *dap* es utilizado en ecuaciones alométricas, para calcular los contenidos nutrientes en los componentes de un árbol promedio de la población (ver **Tabla 3**). El contenido de cada nutriente en un árbol promedio se obtiene al sumar los contenidos en cada componente de dicho árbol. Luego, al multiplicar el contenido de cada nutriente de un árbol promedio por el número de árboles por hectárea, se obtiene la demanda de cada nutriente, expresada en  $\text{kg ha}^{-1}$  para macronutrientes y en  $\text{g ha}^{-1}$  para micronutrientes (**Figura 2**).

Para conocer la cantidad de nutrientes suministrados por el suelo se debe tener en cuenta la profundidad explorada por las raíces del cultivo, la concentración de cada nutriente (obtenida en análisis de rutina) y la tasa de recuperación por el extractante ( $\text{TR}_{\text{ext}}$ )<sup>1</sup> (**Figura 2**). En este trabajo se consideraron las camadas de 0-20 y 20-40 cm ya que en las camadas superficiales (primeros 30-40 cm) se encuentran más de 70% de las raíces finas de eucalyptus (Neves, 2000).

El balance nutricional consiste en hacer la diferencia entre la demanda, estimada para una determinada meta de producción, y el suministro provisto por el suelo. Si el balance arroja un valor positivo, para un dado nutriente, en principio no

es necesario fertilizar con ese nutriente, pero siendo conscientes de que se está reduciendo la fertilidad del suelo (**Figura 2**). Sin embargo, pensando en la sustentabilidad del sistema productivo, es importante tener en cuenta la exportación de nutrientes con los productos cosechados para reponerlos vía fertilización. Además, para el caso particular del P, independientemente de que el balance nutricional sea positivo, se recomienda una fertilización de implantación con 40 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por planta para eucalyptus ya que este nutriente favorece el desarrollo de raíces finas. Este estímulo del P en el arranque se debe a que el nivel crítico para la fase de implantación de eucalyptos es muy elevado, del orden de 60 a 65  $\text{mg kg}^{-1}$  (Bray-1) para suelos arcillosos y arenosos, respectivamente (Bahia Filho et al., 1983; Novais et al., 1986; Stahringer, 2017).

Por otro lado, si el balance arroja un valor negativo, para un dado nutriente, es necesario fertilizar con dicho nutriente para que la meta de productividad no se vea comprometida por este elemento. La cantidad del dado nutriente que debe ser adicionada vía fertilizante equivale a la diferencia entre la demanda y el suministro del nutriente en cuestión dividido por la tasa de recuperación por la planta ( $\text{TR}_{\text{planta}}$ ). Esta última se utiliza para ajustar la dosis a ser adicionada de cada nutriente debido a que los árboles no consiguen absorber el 100% de un nutriente aplicado al suelo vía fertilizante sino una fracción del mismo. El porcentaje de cada nutriente que consiguen absorber es la  $\text{TR}_{\text{planta}}$  (**Figura 2**).



**Figura 2.** Diagrama de flujo del modelo de balance nutricional para cultivos forestales considerando el módulo demanda (planta) y el módulo suministro (suelo). Fuente: Adaptado de Stahringer et al. (2014).



## Resultados y Discusión

Para entender mejor los resultados de este trabajo se plantea un estudio de caso en el cual se utiliza el balance nutricional para calcular la fertilización requerida en dos sitios forestales de Corrientes.

El escenario hipotético corresponde a una plantación de *E. grandis* de semilla<sup>2</sup>, con 1000 árboles ha<sup>-1</sup>, que sería implantada buscando alcanzar un IMA<sub>tronco</sub> a los 4 años (edad del primer raleo) de 35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Utilizando una ecuación alométrica ajustada se obtiene el *dap* de un árbol promedio de este rodal que sería de 15.6 cm. Los dos sitios forestales utilizados en este estudio de caso han sido ganaderos hasta aproximadamente 20 años atrás. Luego tuvieron

un ciclo de eucalyptus y estarían entrando a un segundo ciclo de eucalyptus (son situaciones reales). Así, en un análisis de suelos hecho previo a la implantación del segundo ciclo de eucalyptus, es posible observar que los sitios se diferencian entre si principalmente porque uno posee una mayor fertilidad que el otro (Tabla 1).

A partir de los resultados de análisis de suelo presentados en la Tabla 1, teniendo en cuenta una profundidad explorada por las raíces de 40 cm y considerando las TR<sub>ext</sub>, es posible estimar, en ambos sitios, el suministro de nutrientes por parte de los suelos (Tabla 2).

El suministro de N fue calculado con base en los contenidos de M.O. de cada camada y teniendo

**Tabla 1.** Resultados de análisis de suelo previo a un segundo ciclo de eucalyptus en dos sitios forestales de Corrientes.

Característica	Unidad	Sitio 1		Sitio 2	
		0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
pH <sup>1/</sup>		4.98	4.65	4.32	4.66
M.O. <sup>2/</sup>	% (dag kg <sup>-1</sup> )	1.86	1.19	1.39	0.72
P <sup>3/</sup>	ppm (mg kg <sup>-1</sup> )	2.93	1.72	1.54	0.29
K <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.09	0.06	0.04	0.02
Ca <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	3.27	1.22	0.21	0.25
Mg <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.78	0.46	0.43	0.22
Na <sup>4/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.05	0.04	0.02	0.02
Acidez intercambiable <sup>5/</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	0.11	0.69	0.8	0.71
C.I.C. efectiva (ft)	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	4.3	2.47	1.5	1.22
C.I.C. total (T)	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	5.7	3.37	2.62	1.9
Saturación por bases (V)	%	73.4	52.8	26.6	26.8
Saturación por aluminio (m)	%	2.6	27.9	53.5	58.3
Arena <sup>6/</sup>	%	78.57	76.01	75.92	79.7
Limo <sup>6/</sup>	%	9.36	11.08	14.43	10.51
Arcilla <sup>6/</sup>	%	12.07	12.92	9.65	9.8
Densidad Aparente <sup>7/</sup>	g cm <sup>-3</sup>	1.59	1.64	1.56	1.59
P-rem <sup>8/</sup>	mg L <sup>-1</sup>	46.4	33.9	34.4	37.7

<sup>1/</sup> pH en agua, relación 1:2.5. <sup>2/</sup> Materia orgánica, mét.: Walkey & Black. <sup>3/</sup> P disponible, mét.: Bray-1. <sup>4/</sup> Cationes intercambiables, mét.: Acetato de amonio 1 N a pH 7. <sup>5/</sup> Mét.: KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. <sup>6/</sup> Mét. de Bouyoucos. <sup>7/</sup> Mét.: cilindro de volumen conocido. <sup>8/</sup> P remanente = concentración de P en la solución de equilibrio, determinado luego de agitar por una hora una alícuota de suelo con CaCl<sub>2</sub> 10 mmol L<sup>-1</sup>, conteniendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, siendo la relación suelo:solución de 1:10 (Alvarez V. et al., 2000).

<sup>2</sup> Al comparar las demandas nutricionales de *E. grandis* de semilla (EgS) y la de *E. grandis* clonal (EgC) se observó que poseen diferentes requerimientos (datos no presentados), razón por la cual se deben utilizar las ecuaciones alométricas propias de cada uno de ellos dependiendo si se quiere plantar EgS o EgC (Stahinger, 2017).

en cuenta una tasa de mineralización de N de 3.0% y 1.3% para las camadas de 0-20 y 20-40 cm, respectivamente. Para llegar al valor de N suministrado por camada se utilizó el método desarrollado por Stanford & Smith (1972) y ajustado por Gonçalves et al. (2001) para condiciones de ecosistemas forestales. Las  $TR_{ext}$  de P, K, Ca y Mg fueron obtenidas a partir de un experimento conducido para tal fin (Stahring, 2017). La  $TR_{ext}$  de P considera el porcentaje de arcilla, o, en caso de disponer de la información, utiliza la variable P-rem<sup>3</sup> que tiene la virtud de contemplar porcentaje de arcilla y su mineralogía en una determinación simple (Alvarez et al., 2000). Para K, la  $TR_{ext}$  considera la C.I.C total (T) y el porcentaje de arcilla. Las  $TR_{ext}$  para Ca y Mg son constantes. A su vez, la demanda nutricional se calculó con base en ecuaciones alométricas (Tabla 3), ajustadas por Stahring (2017) a partir de los datos generados en la cubicación de árboles realizada en el trabajo de campo.

La demanda de cada nutriente se calculó sumando los contenidos del nutriente en todos los órganos del árbol y multiplicando este valor por el número de árboles por hectárea. Para incorporar los nutrientes contenidos en las raíces se lo hizo trabajando con base en datos de literatura sobre proporción de nutrientes en este componente (Reis et al., 1987; Neves, 2000). De esta manera fue posible estimar la demanda nutricional considerando tanto parte aérea como sistema radicular de los árboles. A continuación, se explica un ejemplo con K para facilitar la comprensión de esta lógica.

$$\begin{aligned} K \text{ en hojas} &= 36.6 \text{ g árbol}^{-1} = 0.0366 \text{ kg árbol}^{-1} \times 1000 \text{ árboles ha}^{-1} = 36.6 \text{ kg ha}^{-1} \\ K \text{ en ramas} &= 46.4 \text{ g árbol}^{-1} = 0.0464 \text{ kg árbol}^{-1} \times 1000 \text{ árboles ha}^{-1} = 46.4 \text{ kg ha}^{-1} \\ K \text{ en madera} &= 58.1 \text{ g árbol}^{-1} = 0.0581 \text{ kg árbol}^{-1} \times 1000 \text{ árboles ha}^{-1} = 58.1 \text{ kg ha}^{-1} \\ K \text{ en corteza} &= 30.2 \text{ g árbol}^{-1} = 0.0302 \text{ kg árbol}^{-1} \times 1000 \text{ árboles ha}^{-1} = 30.2 \text{ kg ha}^{-1} \\ K \text{ en parte aérea} &= 36.6 + 46.4 + 58.1 + 30.2 = 171.3 \text{ kg ha}^{-1} \\ \text{Demanda total de K} &= (171.3 \text{ kg ha}^{-1} / (100 - 13.3)) \times 100 = 197.6 \text{ kg ha}^{-1} \end{aligned}$$

En este ejemplo, 13.3% del K de los árboles está en las raíces. La demanda total de K para alcanzar una meta de productividad de 35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a los 4 años es de 197.6 kg ha<sup>-1</sup>.

De la misma manera que fue ejemplificado para K, se calculan los contenidos y la demanda de los otros nutrientes (Tabla 4). A partir de los contenidos de nutrientes en la parte aérea se calculó cómo estos se distribuyeron en la parte que será cosechada al final del ciclo (Figura 4). Así, según el sistema de cosecha empleado<sup>4</sup> podemos saber que habrá una mayor o menor exportación de nutrientes.

En el sitio 1 (sitio de mayor fertilidad), se observa que el suelo tiene la capacidad suministrar las cantidades demandadas de N, K, Ca y Mg, pero que se debe fertilizar con P (Tabla 5). La recomendación de dicho nutriente, en kg P ha<sup>-1</sup>, se obtiene al dividir la demanda (3 + 17,5) por la  $TR_{planta}$  para P, la cual considera el factor capacidad de P, por medio del P-rem o del porcentaje de arcilla. Se debe utilizar una fuente soluble de P

**Tabla 2.** Suministro de nutrientes y  $TR_{ext}$  en dos sitios forestales de Corrientes.

Nutriente	Sitio 1					Sitio 2				
	0-20 cm		20-40 cm		TOTAL	0-20 cm		20-40 cm		TOTAL
	$TR_{ext}$	kg ha <sup>-1</sup>	$TR_{ext}$	kg ha <sup>-1</sup>		$TR_{ext}$	kg ha <sup>-1</sup>	$TR_{ext}$	kg ha <sup>-1</sup>	
N		409		117	526		300		69	369
P	0.59	16	0.57	10	26	0.64	7	0.64	1	9
K	0.68	158	0.85	93	251	0.84	56	0.90	32	87
Ca	0.93	2245	0.93	866	3111	0.93	138	0.93	169	307
Mg	0.94	321	0.94	194	515	0.94	175	0.94	91	265

<sup>3</sup> P-rem ha mostrado ser útil como estimador del factor capacidad de P en suelos de México, Brasil y Argentina (Boschetti et al., 1998).

<sup>4</sup> El sistema de cosecha empleado: a) extracción del fuste entero (madera + corteza), b) extracción solos de la madera o c) extracción del árbol entero (madera + corteza + ramas + hojas), tiene una gran influencia en cuanto a la exportación de nutrientes que se haga.

y la aplicación del mismo debe ser incorporado al suelo inmediatamente previo a la implantación o hasta una semana después de la misma. La localización del P cobra aun mayor importancia en suelos rojos de Misiones y el norte de Corrientes, muy utilizados para plantaciones forestales (Figura 1), ya que la fijación de P por parte de estos suelos es elevada (Quintero et al., 1999). Además, por lo que se observa en el balance de K, es probable que en el próximo ciclo se pueda tener respuesta positiva a la fertilización potásica en este sitio, ya que la cantidad que el suelo posee de este nutriente apenas cubre la demanda

del ciclo actual. Suelos con niveles bajos de P y K son frecuentes en Misiones y Corrientes (Escobar et al., 1996; Pérez et al., 2006; Usandivaras, 2015).

Ya en el sitio 2 (sitio de menor fertilidad), el balance nutricional dio negativo para P, K y Ca, indicando que en este sitio el suministro de estos nutrientes no es suficiente para que el cultivo alcance la meta de productividad sin que el aspecto nutricional sea una limitante (Tabla 5). Para P, tener en cuenta que experiencias en diferentes empresas forestales de Brasil demuestran que, en general, no hay respuesta a la fertilización para dosis superiores a 150 kg

**Tabla 3.** Ecuaciones alométricas para estimar contenidos de N, P, K, Ca y Mg (en g/árbol) de los componentes de la parte aérea de *E. grandis* de semilla.

Nutriente	Componente	Ecuación	R <sup>2</sup>
N	Hojas	$\hat{y} = 34.581 e^{0.0791 \text{ dap}}$	0.7795
	Ramas	$\hat{y} = 8.8358 e^{0.1043 \text{ dap}}$	0.8890
	Madera	$\hat{y} = 0.0506 \text{ dap}^{2.5202}$	0.9835
	Corteza	$\hat{y} = 0.0394 \text{ dap}^{2.3137}$	0.9825
P	Hojas	$\hat{y} = 0.3465 \text{ dap}^{1.1831}$	0.7627
	Ramas	$\hat{y} = 0.1107 \text{ dap}^{1.5734}$	0.8457
	Madera	$\hat{y} = 0.0104 \text{ dap}^{2.2632}$	0.9598
	Corteza	$\hat{y} = 0.0036 \text{ dap}^{2.5474}$	0.9231
K	Hojas	$\hat{y} = 9.458 e^{0.0865 \text{ dap}}$	0.8424
	Ramas	$\hat{y} = 9.6758 e^{0.1002 \text{ dap}}$	0.8319
	Madera	$\hat{y} = 0.1099 \text{ dap}^{2.2796}$	0.9777
	Corteza	$\hat{y} = 0.0346 \text{ dap}^{2.4627}$	0.9569
Ca	Hojas	$\hat{y} = 1.7937 \text{ dap}^{1.3616}$	0.7734
	Ramas	$\hat{y} = 11.754 e^{0.1087 \text{ dap}}$	0.9135
	Madera	$\hat{y} = 0.0392 \text{ dap}^{2.6135}$	0.9861
	Corteza	$\hat{y} = 0.077 \text{ dap}^{2.8346}$	0.9692
Mg	Hojas	$\hat{y} = 2.8454 e^{0.0915 \text{ dap}}$	0.8344
	Ramas	$\hat{y} = 1.3583 e^{0.121 \text{ dap}}$	0.9140
	Madera	$\hat{y} = 0.0119 \text{ dap}^{2.3414}$	0.9860
	Corteza	$\hat{y} = 0.0158 \text{ dap}^{2.4955}$	0.9707

**Tabla 4.** Contenido de nutrientes por órgano y por árbol, y demanda nutricional de un rodal de *E. grandis* de semilla con 1000 árboles ha<sup>-1</sup> para alcanzar un IMA<sub>tronco</sub> = 35 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a los 4 años.

Nutriente	Hojas	Ramas	Madera	Corteza	Parte Aérea	Raíces	Árbol	Rodal
	----- g árbol <sup>-1</sup> -----							kg ha <sup>-1</sup>
N	119.2	45.2	51.8	22.9	239.1	37.6	276.7	276.7
P	9.0	8.4	5.3	4.0	26.6	2.5	29.0	29.0
K	36.6	46.4	58.1	30.2	171.3	26.3	197.6	197.6
Ca	75.9	64.4	51.9	187.2	379.3	30.6	409.9	409.9
Mg	11.9	9.0	7.5	15.1	43.5	19.4	62.9	62.9

ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vía fertilizantes solubles. Por lo tanto, debe considerarse ese valor como mayor dosis a ser recomendada para este nutriente. Las TR<sub>planta</sub> de K y Ca consideran la dosis aplicada, siendo que cuanto mayores son las dosis aplicadas, menores son los valores de dichas tasas (Stahringer, 2017). La aplicación de K debe ser dividida en 3 veces, una pequeña dosis en la implantación y las restantes en los primeros 2-3 años del cultivo (Barros y Novais, 1996). Dividir la dosis de K cobra aún mayor importancia en suelos arenosos, como el de este sitio, ya que poseen baja C.I.C. y esto favorece importantes pérdidas por lixiviación en caso de no dividir la dosis recomendada. Respuestas importantes a la aplicación de K en suelos pobres en este nutriente han sido encontradas para eucalyptus (Silveira y Malavolta, 2000; Barros et al., 2014). Por su parte, el Ca, vía calcáreo, debe ser aplicado en un lapso de tiempo que va desde antes de la implantación hasta los 6 meses posterior a la misma (Santana et al., 2014).

## Conclusiones

Considerar tanto la estimación de la demanda nutricional, variable según la especie forestal, como la diferenciación de sitios de acuerdo a su fertilidad puede ayudar a entender mejor diferentes potenciales de respuesta a la fertilización en plantaciones forestales.

La comparación planteada en este trabajo

entre dos sitios forestales de fertilidad diferente permite vislumbrar que puede ser interesante utilizar esta lógica de balance nutricional no solo para recomendación de fertilizantes, sino también para la diagramación de experimentos

Conocer la disponibilidad de nutrientes en los suelos y la cantidad exportada con cada cosecha nos permitirá saber cuan sustentable es nuestro sistema productivo y cuantas rotaciones "tolerará" cada sitio forestal sino reponemos los nutrientes exportados.

## Agradecimientos

Al Dpto. de Suelos de la Univ. Federal de Viçosa, al programa PEC-PG del Min. de Relaciones Exteriores de Brasil, al Min. de Producción de Corrientes, a las empresas forestales Bosques del Plata, EVASA, MASISA, Pomera Maderas y Zeni, al INTA, a la FCA-UNNE.

## Bibliografía

- Alvarez V., V.H., R.F. Novais, L.E. Dias y J.A. Oliveira. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 25(1):27-32.
- Aparicio, J.L., F. Larocca y F. Dalla Tea. 2005. Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. IDIA XXI. p. 66-69.
- Argentina, Ministerio de Modernización. 2018. Inventario nacional de plantaciones forestales

**Tabla 5.** Balance nutricional para llegar a las recomendaciones de nutrientes, en kg ha<sup>-1</sup> de cada nutriente, en los sitios 1 y 2.

Nutriente	Suministro	Demanda	Balance Nutricional	Fertilización de Implantación	TR <sub>planta</sub>	Recomendación
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----					kg ha <sup>-1</sup>
Sitio 1						
N	526	277	250	-	-	0
P	26	29	-3	-17.5	0.53	40
K	251	198	53	-	-	0
Ca	3111	410	2701	-	-	0
Mg	515	63	452	-	-	0
Sitio 2						
N	369	277	92	-	-	0
P	9	29	-20	-17.5	0.53	70
K	87	198	-110	-	0.71	155
Ca	307	410	-103	-	0.37	275
Mg	265	63	202	-	-	0



- por superficie. <http://datos.gob.ar/dataset/inventario-nacional-plantaciones-forestales-por-superficie>.
- Bahia Filho, A.F.C., J.M. Braga, A.C. Ribeiro y R.F. Novais.** 1983. Sensibilidad de extractores químicos a la capacidad tampón de fósforo. *Rev Bras Ciência do Solo*. 7:243–249.
- Barros, N.F., J.C.L. Neves y R.F. Novais.** 2014. Nutrición e Adubación Mineral del Eucalipto. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência*. Viçosa. SIF. Cap 9:187–208.
- Barros, N.F. y R.F. Novais.** 1996. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. En: Attwill, P.M. y M.A. Adams (ed.). *Nutrition of eucalyptus*. Australia: CSIRO. p. 335–355.
- Barros, N.F., R.F. Novais, J.L. Teixeira y E.I. Fernandes Filho.** 1995. NUTRICALC 2.0 - Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. *Bosque*. 16(1):129–131.
- Boschetti, N.G., C.E. Quintero y R.A. Benavidez.** 1998. Caracterización del factor capacidad-tampón de fosfatos en solos de Entre Ríos, Argentina. *Rev Bras Ciência do Solo*. 22:95–99.
- Cruzate, G.A. y J.L. Panigatti.** 2008. Suelos y ambientes de Corrientes. INTA.
- Elizondo, M.H.** 2015. Actualización del Inventario de Plantaciones Forestales de la Provincia de Corrientes. Consejo Federal de Inversiones - Prov. Corrientes.
- Escobar, E.H., H.D. Ligier, R. Melgar, H. Matteio y V. Vallejos.** 1996. Mapa de Suelos de la Provincia de Corrientes 1:500.000. Corrientes: Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales E.E.A. INTA - Corrientes.
- Gonçalves, J.L.M., K.C.F.S. Mendes y C.M. Sasaki.** 2001. Mineralización de Nitrógeno en ecosistemas forestales naturales e implantados del estado de São Paulo. *Rev Bras Ciência do Solo*. 25(3):601–616.
- Goya, J.F., C. Pérez, J.L. Frangi y R. Fernández.** 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral*. 13:139–150.
- Landsberg, J.J. y R.H. Waring.** 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For Ecol Manage*. 95:209–228.
- Larocca, F., F. Dalla Tea y J.L. Aparicio.** 2004. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. VII 1-16.
- Neves, J.C.L.** 2000. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Novais, R.F., N.F. Barros y J.C.L. Neves.** 1986. Interpretación de análisis química del suelo para el crecimiento y desarrollo de *Eucalyptus* spp. - niveles críticos de implantación y de mantenimiento. *Rev Árvore*. 10(1):105–111.
- Pérez CA, Goya JF, Bianchini F, Fernández R.** 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*. 31:794–801.
- Quintero, C.E., G.N. Boschetti y R.A. Benavidez.** 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinean Mesopotamia. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 30(9-10):1449–1461.
- Reis, M.G.F., N.F. Barros y J.P. Kimmins.** 1987. Acúmulo de nutrientes en una secuencia de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. *Rev Árvore*. 11(1):1–15.
- Santana, R.C., I.C.I. Fontan y S.L. Oliveira.** 2014. Implantación, mantención y productividad de los povoamentos. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência*. Viçosa. SIF. Cap 8:161–186.
- Silveira, R.L.V.A. y E. Malavolta.** 2000. Nutrición e adubación potásica en eucalyptus. *Informações Agronômicas*. 91:1–12.
- Stahring, N.I.** 2017. Parametrización de modelos de productividad e de balanceo nutricional para *Pinus* e *Eucalyptus* en Corrientes - Argentina. Universidad Federal de Viçosa.
- Stahring, N.I., J.C.L. Neves, B.F. Martins, B.G. Andrade, J.P. Caliman y C.A.A.S. Ribeiro.** 2014. Índice de Qualidade de Sítio (IQS) como forma de prever o requerimento nutricional para eucalipto. *FertBio* 2014. Araxá, MG.
- Stanford, G. y S.J. Smith.** 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci Soc Amer Proc*. 36(3):465–472.
- Usandivaras, L.M.A.** 2015. Deficiencias de fósforo y potasio en maíz. Efectos sobre el área foliar, crecimiento y absorción de nutrientes. Tesis M.Sc. Universidad de Buenos Aires. ◀

- por superficie. <http://datos.gob.ar/dataset/inventario-nacional-plantaciones-forestales-por-superficie>.
- Bahia Filho, A.F.C., J.M. Braga, A.C. Ribeiro y R.F. Novais.** 1983. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. *Rev Bras Ciência do Solo*. 7:243–249.
- Barros, N.F., J.C.L. Neves y R.F. Novais.** 2014. Nutrição e Adubação Mineral do Eucalipto. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência*. Viçosa. SIF. Cap 9:187–208.
- Barros, N.F. y R.F. Novais.** 1996. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. En: Attwill, P.M. y M.A. Adams (ed.). *Nutrition of eucalyptus*. Australia: CSIRO. p. 335–355.
- Barros, N.F., R.F. Novais, J.L. Teixeira y E.I. Fernandes Filho.** 1995. NUTRICALC 2.0 - Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. *Bosque*. 16(1):129–131.
- Boschetti, N.G., C.E. Quintero y R.A. Benavidez.** 1998. Caracterização do fator capacidade-tampão de fosfatos em solos de Entre Ríos, Argentina. *Rev Bras Ciência do Solo*. 22:95–99.
- Cruzate, G.A. y J.L. Panigatti.** 2008. Suelos y ambientes de Corrientes. INTA.
- Elizondo, M.H.** 2015. Actualización del Inventario de Plantaciones Forestales de la Provincia de Corrientes. Consejo Federal de Inversiones - Prov. Corrientes.
- Escobar, E.H., H.D. Ligier, R. Melgar, H. Matteio y V. Vallejos.** 1996. Mapa de Suelos de la Provincia de Corrientes 1:500.000. Corrientes: Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales E.E.A. INTA - Corrientes.
- Gonçalves, J.L.M., K.C.F.S. Mendes y C.M. Sasaki.** 2001. Mineralização de Nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. *Rev Bras Ciência do Solo*. 25(3):601–616.
- Goya, J.F., C. Pérez, J.L. Frangi y R. Fernández.** 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral*. 13:139–150.
- Landsberg, J.J. y R.H. Waring.** 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For Ecol Manage*. 95:209–228.
- Larocca, F., F. Dalla Tea y J.L. Aparicio.** 2004. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. VII 1-16.
- Neves, J.C.L.** 2000. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Novais, R.F., N.F. Barros y J.C.L. Neves.** 1986. Interpretación de análisis química do solo para o crescimento e desenvolvimento de *Eucalyptus* spp. - níveis críticos de implantação e de manutenção. *Rev Árvore*. 10(1):105–111.
- Pérez CA, Goya JF, Bianchini F, Fernández R.** 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*. 31:794–801.
- Quintero, C.E., G.N. Boschetti y R.A. Benavidez.** 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinean Mesopotamia. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 30(9-10):1449–1461.
- Reis, M.G.F., N.F. Barros y J.P. Kimmins.** 1987. Acúmulo de nutrientes em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. *Rev Árvore*. 11(1):1–15.
- Santana, R.C., I.C.I. Fontan y S.L. Oliveira.** 2014. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência*. Viçosa. SIF. Cap 8:161–186.
- Silveira, R.L.V.A. y E. Malavolta.** 2000. Nutrição e adubação potássica em eucalyptus. *Informações Agrônomicas*. 91:1–12.
- Stahring, N.I.** 2017. Parametrização de modelos de produtividade e de balanço nutricional para *Pinus* e *Eucalyptus* em Corrientes - Argentina. Universidade Federal de Viçosa.
- Stahring, N.I., J.C.L. Neves, B.F. Martins, B.G. Andrade, J.P. Caliman y C.A.A.S. Ribeiro.** 2014. Índice de Qualidade de Sítio (IQS) como forma de prever o requerimento nutricional para eucalipto. *FertBio* 2014. Araxá, MG.
- Stanford, G. y S.J. Smith.** 1972. Nitrogen mineralization potenciales of soils. *Soil Sci Soc Amer Proc*. 36(3):465–472.
- Usandivaras, L.M.A.** 2015. Deficiencias de fósforo y potasio en maíz. Efectos sobre el área foliar, crecimiento y absorción de nutrientes. Tesis M.Sc. Universidad de Buenos Aires. ◀

# Buenas prácticas de manejo de fertilizantes y enmiendas en suelos acidificados de la Región Pampeana

Martín Torres Duggan<sup>1</sup>; Ignacio Alzueta<sup>2</sup>, José Lamelas<sup>1</sup> y Mónica B. Rodríguez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> TECNOAGRO; <sup>2</sup> AAPRESID y Plexagro; <sup>3</sup> Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, FAUBA.  
mjjtorresduggan@gmail.com

## Introducción

Limitantes de fertilidad edáfica como la acidez y la alcalinidad constituyen uno de los principales condicionantes para maximizar la productividad de los cultivos en ambientes de la Región Pampeana. Si bien es relativamente abundante la literatura científica publicada en la Argentina sobre manejo de suelos afectados por estos problemas de fertilidad edáfica, se evidencia una baja implementación de buenas prácticas de manejo (BPM) a escala predial. Posiblemente esto se deba a diversos factores como el régimen de tenencia de las tierras (alquileres de corto plazo); incertidumbre política, económica e institucional para realizar inversiones que prioricen el largo plazo sobre el corto plazo (necesarias para destinar recursos que mejoren la calidad de los suelos); y/o reducida o ineficaz actividad de extensión y comunicación agropecuaria, entre otros.

La acidificación de suelos en el ámbito templado de la Región Pampeana es un fenómeno que despierta un creciente interés por parte de la comunidad profesional agropecuaria. El objetivo del presente artículo de extensión es ofrecer bases conceptuales y prácticas para el diagnóstico y manejo de suelos afectados por procesos de acidificación, con énfasis en la caracterización y tecnología de aplicación de fertilizantes y enmiendas en sistemas de siembra directa.

## ¿Cómo evaluar suelos acidificados y cómo manejarlos?

Como primer marco conceptual es importante tener claras las diferencias entre la condición de fertilidad de suelos genéticamente ácidos (e.g. Oxisoles y/o Ultisoles) y aquellos suelos que no lo son desde el punto de vista edafogenético, pero que se han acidificado por diferentes causas (e.g. Molisoles de la Región Pampeana). En este escrito nos centraremos en este último caso.

El origen de la acidificación de los suelos en la Región Pampeana es principalmente la remoción de bases en los productos cosechados (e.g. granos, forraje) en contextos de muy bajo uso de fertilizantes y enmiendas cálcicas y/o cálcico magnésicas; la pérdida geoquímica de cationes fuera del sistema suelo (e.g. lixiviación de cationes) y, en menor medida, la fertilización nitrogenada. Es importante recordar que los balances de nitrógeno (N) en los agrosistemas de la Región Pampeana de Argentina son marcadamente negativos, y por ello la fertilización nitrogenada actúa más bien como una covariable regional que puede modular (aumentando o reduciendo) la magnitud de la acidificación, pero no es el principal regulador. Así, este contexto es bien diferente al que se puede observar en sistemas de producción intensificados y con altas dosis de aporte de N como EE.UU. o Australia, donde la principal causa de acidificación es la fertilización nitrogenada.

En la actualidad, si bien los suelos acidificados constituyen una superficie relativa del total cultivado en la Región Pampeana (i.e. escala regional), tienen un significativo impacto a escala subregional y local. Esto se evidencia cuando analizamos determinados tipos de cultivos que por su especial sensibilidad a la acidez edáfica y por cultivarse en suelos acidificados, reducen marcadamente la posibilidad de alcanzar los máximos niveles productivos. Algunos ejemplos de estos cultivos son la alfalfa y pasturas a base de leguminosas, maní y también cultivos de grano como soja o trigo en donde existen antecedentes de respuestas económicas y significativas a la aplicación de enmiendas cálcicas y/o cálcico magnésicas en sistemas de siembra directa.

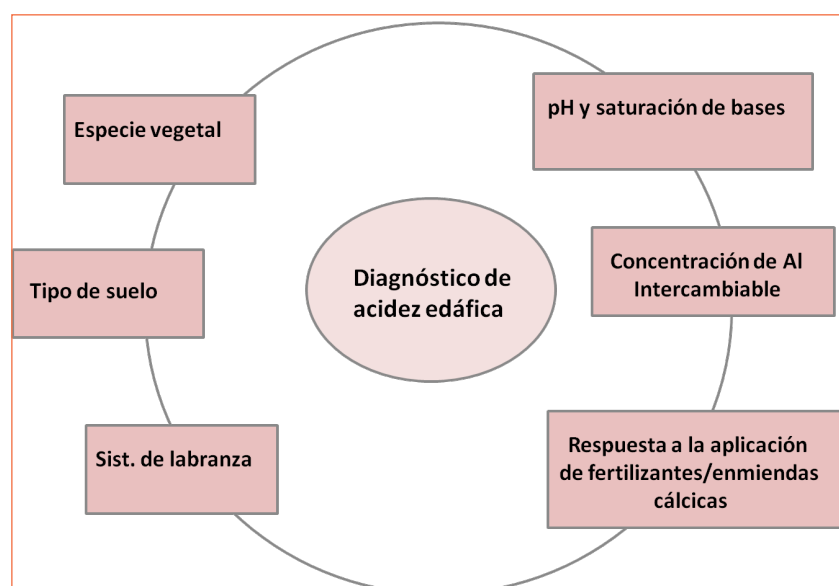
## Diagnóstico

El diagnóstico de suelos acidificados requiere de un abordaje integral considerando diversos factores como las características de los suelos, clima, y/o tipo de cultivo, entre otros (Figura 1).

Para una determinada región agroecológica y teniendo en cuenta la escala predial, los principales aspectos a considerar para diagnosticar limitaciones de acidez edáfica en suelos no ácidos, son la cartografía de suelos a escala detallada (mapas básicos de suelos a escala 1:20.000 o de mayor detalle) y los análisis de suelos. Los mapas detallados de suelos, por representar un inventario del tipo de suelos y su capacidad productiva (e.g. capacidad de uso), deberían ser el principal marco de referencia para la planificación de uso de las tierras. Asimismo, en sistemas donde se realiza agricultura por ambientes, los mismos se suelen complementar con otras fuentes de información como los mapas de elevación del terreno (mapas topográficos), imágenes de índices de vegetación, mapas de rendimientos, entre otros.

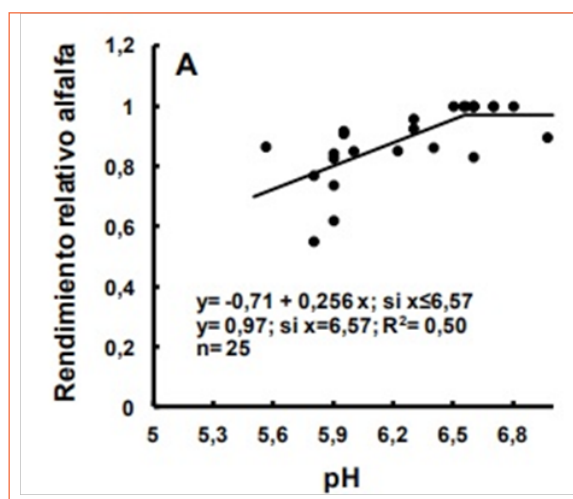
En cuanto a la evaluación de la fertilidad del suelo, los principales indicadores que permiten definir la magnitud del problema de acidez son:

1. pH y textura.
2. Concentración de bases y su saturación en relación a la CIC.
3. Concentración de aluminio soluble y/o intercambiable (según nivel de pH).
4. Otros atributos y/o propiedades de interés (e.g. MO, estado de degradación física de los suelos, etc.).



**Figura 1.** Factores relevantes a considerar en el diagnóstico de la acidez edáfica en agrosistemas.

La mayor parte de la información disponible en cuanto a modelos de diagnóstico de acidez edáfica en ambientes de la Región Pampeana se ha generado en el cultivo de alfalfa y/o recursos forrajeros que la incluyen como componente relevante. Así, para maximizar la producción de esta especie es necesario que el pH alcance niveles superiores a 6,5 (Figura 2).



**Figura 2.** Productividad de la alfalfa en función del pH. Fuente: Álvarez et al. (2015) en base a datos de ensayos realizados en la porción húmeda de la Región Pampeana.



Se debe tener en cuenta que, si bien se conoce que la alfalfa maximiza su producción forrajera con niveles de pH superiores a 6,5 ya que se optimiza la FBN y se logra un adecuado equilibrio y balance nutricional (asumiendo una adecuada fertilización), las dosis de enmienda calcárea que se han calibrado en las décadas de los 90's o comienzos de la década del 2000 en suelos con labranza, no son representativas ni adecuadas para aplicar en ambientes en siembra directa donde los correctores se aplican sobre la superficie del suelo sin incorporar. Así, los experimentos de evaluación de respuesta a diferentes dosis de enmienda calcárea en condiciones de campo en sistemas de siembra directa, son una referencia empírica de utilidad (Figura 3).

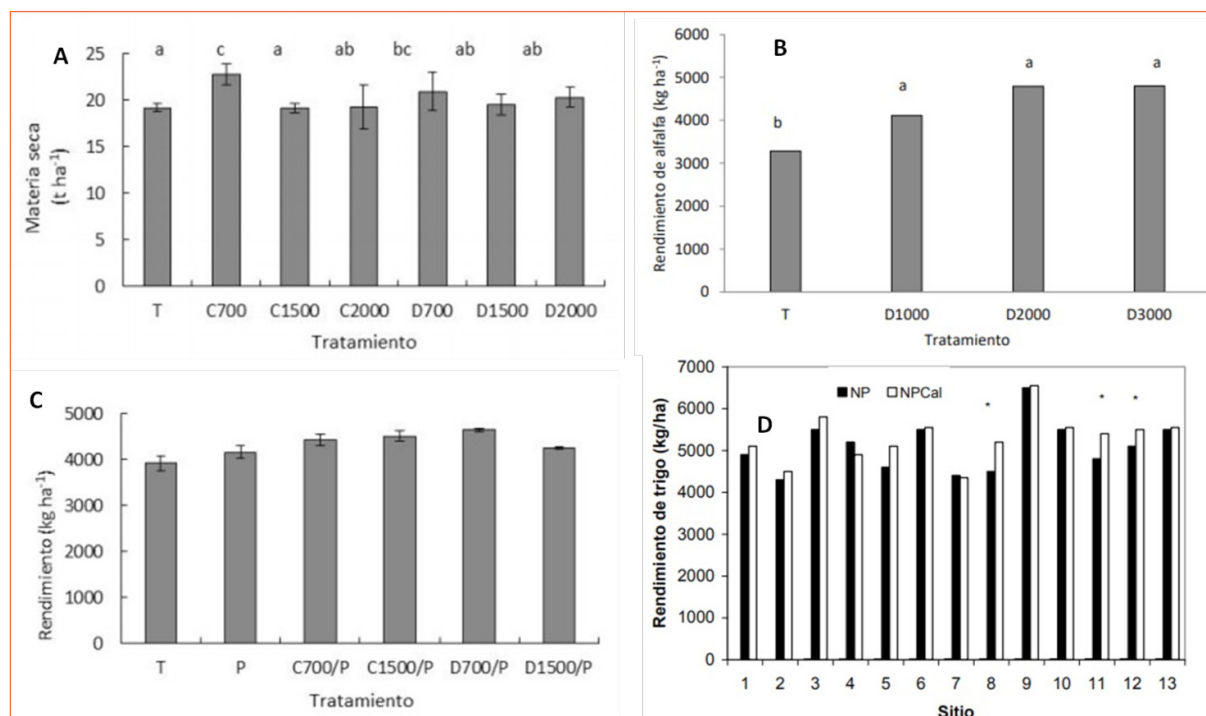
En términos generales, la información que se ha generado en los últimos años sobre manejo de fertilizantes o enmiendas calcáreas en planteos en siembra directa puede considerarse exploratoria. Por ello, es necesario que se vayan generando calibraciones a escala regional y/o subregional obtenidas a partir de la realización de experimentos en diferentes ambientes edáficos y

durante varios años como para poder diagnosticar deficiencias de bases y/o definir con exactitud las dosis de fertilizantes y/o enmiendas a aplicar que maximicen el rendimiento de los cultivos.

Teniendo en cuenta que aún bajo situaciones de escasa información experimental se deben decidir prácticas de manejo tendientes a mitigar limitaciones por acidez edáfica en planteos en siembra directa, es importante considerar algunas premisas:

### 1. La situación dominante de acidificación parecería estar más asociada a bajos contenidos de cationes básicos que a toxicidad por aluminio.

La información experimental disponible muestra que, por un lado, los niveles de pH superficiales (0-20 cm) no son lo suficientemente bajos como para que se detecten contenidos elevados de aluminio soluble. Asimismo, a medida que se profundiza por debajo de la capa superficial, los niveles de pH y de bases tienden a aumentar en la mayor parte de los Molisoles pampeanos. Así, el problema de acidez en realidad corresponde



**Figura 3.** A. Aplicación de calcita y dolomita en alfalfa en suelo Hapludol éntico de Laboulaye (pH=5,1) (Vázquez et al., 2010). B. Agregado de dolomita en alfalfa en suelo Hapludol thapto árgico (pH=5,5) (Machietti et al., 2016). C. Agregado de calcita o dolomita con y sin agregado de fósforo en soja en suelo Argiudol thaptoárgico (pH=5,7) (Vázquez et al., 2012). D. Aplicación de 700 kg.ha<sup>-1</sup> de carbonato de calcio en el cultivo de trigo en sitios experimentales del SE de Buenos Aires (Echeverría et al., 2007).

más al de deficiencias de Ca y Mg. Por ello, más allá de evaluar la necesidad de "corrección del suelo", es necesario diagnosticar de un modo integral la disponibilidad de cationes básicos integrando la corrección del suelo con la fertilización de los cultivos.

## 2. Las dosis de corrector (carbonatos de calcio y/o de calcio y magnesio) que permiten optimizar la respuesta de los cultivos en planteo de siembra directa son, en general, bajas y de aplicación frecuente

Si bien no hay información local, estudios realizados en EE.UU. recomiendan reducir a la mitad las dosis de aplicación de carbonatos de calcio en siembra directa en comparación con las dosis calibradas para suelos con labranza y mayor énfasis en la frecuencia de aplicación (Dorivar Ruiz Díaz, comunicación personal). Esto se debe a la baja solubilidad de los carbonatos de calcio y/o de calcio y magnesio que cuando se aplican sobre el suelo se terminan solubilizando solamente en los primeros centímetros del suelo (típicamente en los primeros 5 cm y algunos trabajos muestran máximas penetraciones hasta 10 cm).

Para las condiciones de la Región Pampeana y en cultivos como alfalfa o soja, algunos experimentos recientes muestran que dosis bajas, del orden de los 500 o 700 kg.ha<sup>-1</sup> de enmienda calcárea (i.e. rocas calcíticas o dolomíticas) generan aumentos significativos en la productividad, mientras que el aumento de las dosis no conducen a mayores respuestas. En este sentido y en forma preliminar, posiblemente el rango práctico de evaluación de dosis de enmiendas calcáreas se ubique entre 500 y 1500 kg.ha<sup>-1</sup> para la mayor parte de los ambientes acidificados del ámbito templado de esta región. También el contenido de MO del suelo es un indicador importante para definir la estrategia de aplicación de correctores. Suelos con mayores niveles de MO (que a su vez están asociados con suelos con mayor contenido de arcillas), por su mayor estabilidad estructural, permiten la aplicación de mayores dosis de corrector calcáreo, sin generar procesos de recristalización del mineral en la superficie. Este proceso se ha observado en suelos de la Región Semiárida Pampeana cuando se superan dosis de 1,5 ton.ha<sup>-1</sup> de calcita/dolomita en donde los suelos evidencian un aumento significativo de su dureza (resistencia mecánica) y caídas en la tasa de infiltración de agua.

## Calidad de los fertilizantes y/o enmiendas

Considerando que, en términos generales, los problemas de "acidificación" son más bien de deficiencias de bases (principalmente de Ca y Mg), el abordaje tecnológico pasa por asegurar la disponibilidad de estos nutrientes a lo largo del ciclo de los cultivos. Para ello, debemos seleccionar la fuente adecuada para cada objetivo. Si el objetivo es principalmente proveer Ca y/o Mg, se pueden utilizar fuentes cálcicas solubles disponibles en el mercado aplicando dosis relativamente bajas, siempre basado en un adecuado diagnóstico de fertilidad (i.e. análisis de suelos y plantas). Ejemplos de fuente de Ca de solubilidad intermedia pero efectivos desde el punto de vista de su solubilización en el suelo, se encuentra el yeso (sulfato de calcio bihidratado) o bien fertilizantes muy solubles (y en general, más caros) como el nitrato de calcio o similares.

Si además de garantizar niveles adecuados de Ca y/o Mg biodisponibles debemos incrementar el pH para ubicarlo en rangos que optimicen la nutrición del cultivo, es necesario aplicar materiales con reacción alcalina. Los típicos productos utilizados para este fin son las rocas carbonatadas, que presentan pureza y composición mineralógica variable y son muy poco solubles en agua. Asimismo, también se ofrecen en el mercado formulaciones en base a óxidos e hidróxidos de calcio que presentan mayor reactividad en el suelo, aunque requieren algunas consideraciones especiales para su manejo por tratarse de materiales cáusticos. La tendencia en innovación de productos es elaborar mezclas químicas que aportan en el mismo gránulo Ca y Mg de diferente solubilidad y reactividad. Para ello se utilizan como materia prima rocas portadoras de calcita y/o dolomita, óxidos o hidróxidos de Ca y Mg, yeso, entre otros.

Para poder evaluar adecuadamente la calidad de los "correctores de acidez" debemos conocer y/o definir las siguientes características:

### 1. La naturaleza química y pureza de los materiales

La calidad química del corrector se define en base a su equivalente en carbonato de calcio. Sin embargo, cuando se utilizan calizas (rocas portadoras de carbonatos de calcio o calcitas)

o dolomías (rocas portadoras de carbonato doble de calcio y magnesio o calcita) o rocas que tengan una “tendencia” más calcítica o más dolomítica, la pureza y composición puede ser muy variable. Esta heterogeneidad es intrínseca de cualquier roca y, por ello, depende fundamentalmente del tipo de recurso geológico (yacimiento) explotado y de su procesamiento posterior. En general, por el costo de las calizas o dolomías, no se realiza un beneficio del mineral, sino que se aplican procesos de trituración primaria y secundaria (molienda) para llevarlo a la granulometría de comercialización.

Conocer la especie química del corrector (por ejemplo, si se trata de calcáreos u óxidos o hidróxidos) es fundamental para predecir el funcionamiento y comportamiento del fertilizante y/o enmienda aplicada en el sistema suelo-cultivo. Sobre todo, permite inferir su reactividad y/o velocidad de disolución (aspectos que inciden en el tiempo y profundidad de acción del corrector en el suelo). En el caso de las rocas carbonáticas, además de conocer su composición química (i.e. pureza), resulta útil tener alguna referencia adicional sobre el origen geográfico y geológico del material. Por ejemplo, un rasgo importante es si el calcáreo presenta materiales “insolubles” (silicatos) en su composición. La presencia de este tipo de componentes puede estar presente en calizas metamórficas reduciendo su reactividad en el suelo.

El conocimiento de la especie química también permite ajustar el manejo logístico a campo, ya que, por ejemplo, el uso de óxidos e hidróxidos, por su carácter cáustico, pueden requerir ciertos cuidados que no son necesarios cuando

se aplican carbonatos. El carácter caustico de los óxidos e hidróxidos se minimiza cuando se utilizan productos granulados adecuadamente formulados.

**2. El “equivalente carbonato de calcio” tomado como referencia que 100% corresponde al carbonato de calcio puro. Este atributo también se conoce como eficiencia química (EQ)**

Este valor se determina en base al análisis químico del material, relacionándolo con el valor de referencia (100% = carbonato de calcio puro) (Tabla 1).

**3. La eficiencia granulométrica o reactividad, que surge del análisis de las fracciones granulométricas del material calcáreo (EG).**

La granulometría es un atributo de marcada influencia agronómica cuando se utilizan calizas, cuya reactividad aumenta a medida que se reduce su granulometría (Tabla 2). En la Argentina hay equipamiento adecuado tanto para la aplicación de enmiendas calcáreas en polvo, siendo usual la leve humectación de las mismas previas a la aplicación, o bien productos granulados obtenidos mediante pelletización de fracciones finas de carbonato utilizando agentes aglomerantes *ad hoc*. Tanto el carbonato en polvo aplicado como tal, o bien éste mismo polvo aglomerado y granulado, presentan equivalente reactividad en el suelo y por consiguiente similar efectividad agronómica.

Es importante aclarar que los valores de eficiencia relativa (o eficiencia física o granulométrica) que se indican en la Tabla 2 se generaron para

**Tabla 1.** Equivalente carbonato de calcio de diferentes materiales utilizados para mitigar problemas de acidez edáfica. Fuente: Espinosa y Molina (1999).

Material	Equivalente Químico (EQ)	Fórmula	Contenido de Ca (%)	Contenido de Mg (%)
Carbonato de Calcio	100	CaCO <sub>3</sub>	40	
Dolomita	108	CaCO <sub>3</sub> • MgCO <sub>3</sub>	21.6	13.1
Oxido de calcio	179	CaO	71	
Hidróxido de calcio	138	Ca(OH) <sub>2</sub>	54	
Hidróxido de magnesio	172			41
Carbonato de magnesio	119			28.5
Oxido de magnesio	248	MgO		60
Silicato de calcio	86	CaSiO <sub>3</sub>	34.4	
Silicato de magnesio	100	MgSiO <sub>3</sub>		24

materiales calcáreos (calizas o dolomías). Así, un 100% de eficiencia relativa significa que reaccionarán en 2-3 meses. Sin embargo, la velocidad de reacción es mayor cuando se aplican óxidos e hidróxidos de calcio.

#### 4. Poder relativo de neutralización total (PRNT)

El PRNT es el índice con el cual se evalúa la calidad de los materiales correctores de acidez edáfica. Este índice integra en su cálculo la eficiencia química (equivalente carbonato de calcio) y física (reactividad), y es la base para definir y seleccionar materiales calcáreos u otros productos (e.g. óxidos, hidróxidos, etc.) (Caja 1).

#### 5. Costo por unidad de PRNT y dosis real a aplicar a campo

Cuando se comparan diferentes opciones de correctores, no sólo es importante conocer el precio por tonelada (típico dato comercial), sino también calcular el costo o precio por unidad de PRNT. Para un mismo precio del producto en USD.ton<sup>-1</sup> (puesto en el campo), a mayor PRNT menor es el precio o costo por unidad de PRNT. Es importante evaluar en laboratorios de referencia la calidad de los materiales correctores ya que pueden existir bastantes diferencias entre lo que indica la hoja técnica del producto y lo efectivamente determinado en una determinada partida de producto.

**Tabla 2.** Eficiencia relativa, física o reactividad de materiales calcáreos según granulometría

<i>Tamiz IRAM</i>	<i>Eficiencia relativa (%)</i>
2,36 mm	5
0,850 mm	17
0,425 mm	30
0,250 mm	55
0,150 mm	80
0,075 mm	100
< 0,075mm	125

**Caja 1.** ¿Cómo calcular el Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT)?

$$\text{PRNT (\%)} = \% \text{ E CaCO}_3 \times \frac{\% \text{ ERg}}{100}$$

donde:

E CaCO<sub>3</sub> = Equivalente Porcentual en Carbonato de Calcio  
Erg = Eficiencia Relativa Granulométrica Porcentual


$$\text{EQ CaCO}_3 = \text{CaO(\%)} \times 1.79 + \text{MgO(\%)} \times 2.48 \quad (12)$$

$$\text{EQ CaCO}_3 = \text{CaCO}_3(\%) \times 1 + \text{MgCO}_3(\%) \times 1.19 \quad (13)$$

<i>Calidad</i>	<i>PRNT (%)</i>
Superior	Más del 90
Buena	Entre el 75 y 90
Regular	Entre el 60 y 74
Inferior	Entre el 45 y 59



## Ejemplos de resultados de análisis de calidad de calizas en laboratorio

 <p><b>Tecnoagro S.R.L. - Laboratorio Inagro</b></p> <p>Girardot 1331 (C1427AKC) C.A.B.A.          (011) 4553-2474 (rot.) laboratorio@tecnoagro.com.ar          www.tecnoagro.com.ar</p>	Informe Nro.:	
	<b>INFORME DE ENSAYOS QUÍMICOS DE FERTILIZANTES</b>	
	Identificación: Dolomita	Cliente:
	Fertilizante: Enmienda	Recibido:
Remitente:	Establecimiento:	

ENSAYO	UNIDAD	VALOR
Calcio	%	22.6
Magnesio	%	9.2
Porcentaje retenido en tamiz 8 (2.38 mm)	%	0.0
Porcentaje retenido en tamiz 20 (0.84 mm)	%	7.1
Porcentaje retenido en tamiz 40 (0.425 mm)	%	32.0
Porcentaje retenido en tamiz 60 (0.250 mm)	%	18.7
Porcentaje retenido en tamiz 100 (0.150 mm)	%	14.5
Porcentaje retenido en tamiz 200 (0.075 mm)	%	19.0
% Partículas menores a 0.075 mm	%	8.7
Eficiencia relativa de enmiendas calcáreas	%	62.6
Equivalente carbonato de calcio (g CO <sub>3</sub> Ca)	g/100g	94.6
Poder relativo de neutralización total	g/100g	59.2

Identificación: Caliza 3	Cliente:
Fertilizante: Enmienda	Recibido:
Remitente:	Establecimiento:

ENSAYO	UNIDAD	VALOR
Calcio	%	25.5
Magnesio	%	1.3
Porcentaje retenido en tamiz 8 (2.38 mm)	%	18.8
Porcentaje retenido en tamiz 20 (0.84 mm)	%	25.2
Porcentaje retenido en tamiz 40 (0.425 mm)	%	18.8
Porcentaje retenido en tamiz 60 (0.250 mm)	%	24.4
Porcentaje retenido en tamiz 100 (0.150 mm)	%	10.5
Porcentaje retenido en tamiz 200 (0.075 mm)	%	2.1
% Partículas menores a 0.075 mm	%	0.1
Eficiencia relativa de enmiendas calcáreas	%	34.9
Equivalente carbonato de calcio (g CO <sub>3</sub> Ca)	g/100g	69.3
Poder relativo de neutralización total	g/100g	24.2

Un aspecto crítico que a veces se soslaya es el ajuste de la dosis final a aplicar a campo teniendo en cuenta la información de PRNT. Las dosis de calcáreo que surgen ya sean de incubaciones y/o análisis de laboratorios o bien de experimentos realizados en condiciones controladas (e.g. ensayos en maceta) o de campo, se suelen definir en kg o toneladas por hectárea de equivalente carbonato. Esta dosis considera 100% de PRNT. Si el material utilizado difiere de este valor se debe aumentar o reducir la dosis real a aplicar a campo. Asimismo, una vez obtenida la "dosis efectiva" a aplicar se pueden calcular otros indicadores relevantes como la cantidad total de producto que se debe comprar y el costo de aplicación por hectárea, que en conjunto permiten definir cuál es la mejor alternativa tanto desde el punto de vista de la eficiencia agronómica esperada como así también desde el punto de vista económico y logístico.

### Tecnología de aplicación

Más allá de algunos experimentos puntuales que se han conducido en los últimos años, no se dispone en el ámbito local de información experimental regional y/o subregional sobre diagnóstico de acidez edáfica y tecnología de aplicación de materiales calcáreos en sistemas

de siembra directa. La mayor parte de la información que se ha investigado en la Región Pampeana corresponde al "viejo paradigma" (manejo con labranza). Sin embargo, es posible establecer algunos principios a considerar para el manejo de correctores en planteos de siembra directa (Figura 4).

Como se puede apreciar en la Figura 4, una premisa relevante es la aplicación de dosis bajas de enmiendas (típicamente en el rango de los 500 a 1500 kg ha<sup>-1</sup> de equivalente carbonato de calcio). Debido a que estos materiales son poco solubles, no es efectivo aplicar dosis muy altas ya que alcalinizarían marcadamente los primeros centímetros, reduciendo aún más la disolución del material. Asimismo, la aplicación frecuente, el tiempo y el uso de dosis bajas de calcáreo permiten corregir y aportar Ca y/o Mg disponibles en los primeros centímetros del suelo que es donde se manifiesta la mayor reducción de la saturación de bases o del pH. Esto representa una diferencia muy considerable en relación a los problemas de acidez que se observan frecuentemente en países como Brasil, Paraguay o inclusive Uruguay, donde además de los bajos niveles de pH o de saturación de bases, presentan muy frecuentemente elevados contenidos de Al soluble e intercambiable en

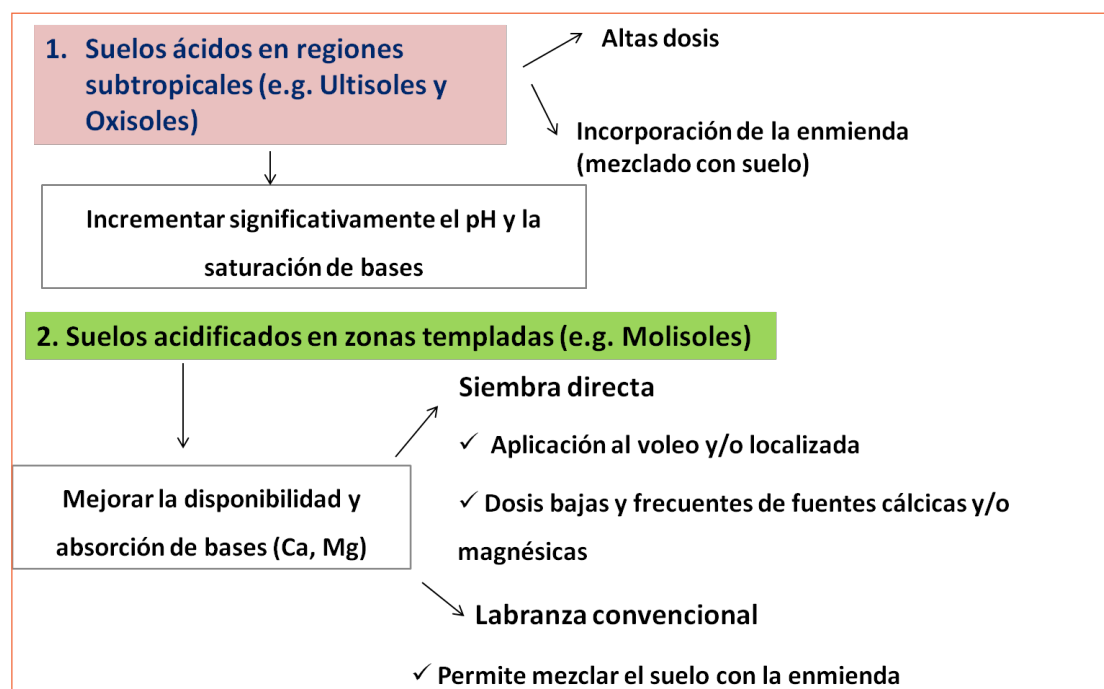


Figura 4. Modelo conceptual para definir la estrategia de aplicación de correctores de acidez según el tipo de suelo y sistema de labranza.

el suelo tanto a nivel superficial (e.g. Uruguay) o subsuperficial (e.g. Brasil). En los suelos Molisoles de la Región Pampeana, la mayor parte de los perfiles de suelos muestran aumentos del pH en profundidad y presencia de carbonatos. Así, la problemática de la "acidificación" de suelos en el ámbito templado de la Región Pampeana parecería ser más bien un problema nutricional (carencias y/o deficiencias de bases en la capa superficial) más que un típico problema de "acidez edáfica" que tradicionalmente incluye efectos negativos de la toxicidad del Al extractable sobre el crecimiento y desarrollo de las raíces. Sin embargo, a medida que se intensifique la fertilización nitrogenada (sobre todo en términos de dosis de aplicación), aún en los suelos Molisoles de la Región Pampeana, podrían observarse descensos más significativos del pH que generarían problemas de toxicidad de Al tal como ocurre por ejemplo en el Medio Oeste de EE.UU. en cultivos como trigo o maíz que reciben dosis elevadas de N en ambientes comparables con los nuestros en términos edáficos.

Para maximizar la solubilización y penetración de los materiales calcáreos en el suelo en planteos de siembra directa, suele recomendarse la aplicación combinada de calizas o dolomías con yeso (sulfato de calcio bihidratado). Algunas empresas que proveen este tipo de productos en la Argentina ofrecen la posibilidad de diferentes mezclas (e.g. 80-30 o 50-50% p/p).

Independientemente de la calidad y dosis de aplicación del calcáreo, cuando el problema de acidez edáfica requiere principalmente aumentar el pH (e.g. suelos acidificados donde se realiza producción de alfalfa), es importante que la aplicación se realice en forma anticipada a la siembra, por lo menos 2-3 meses previo a la siembra. Cuando se aplican óxidos o hidróxidos o productos formulados en base a éstos, su mayor velocidad de reacción permite reducir el tiempo de anticipación, aunque no se dispone de curvas y/o estudios *ad hoc* para las condiciones locales.

En situaciones donde el objetivo es maximizar la provisión de cationes básicos como Ca o Mg (i.e. "fertilización cálcica o cálcico-magnésica"), se pueden seleccionar productos que tengan una mayor velocidad de reacción o solubilidad que las calizas o dolomías. Algunos ejemplos de fuentes de Ca y/o Mg para considerar en

estos casos son la kieserita (sulfato de magnesio monohidratado), yeso (sulfato de calcio bihidratado), nitrato de calcio, entre otros. La decisión de cuál utilizar depende del precio y contenido de nutrientes, condiciones comerciales, servicios ofrecidos por el proveedor, entre otros aspectos.

## Conclusiones y consideraciones finales

La implementación de BPM de fertilizantes y enmiendas en suelos acidificados y/o con deficiencias de cationes básicos en la Región Pampeana, requiere de la realización de un adecuado diagnóstico y posterior selección de los materiales a aplicar para mitigar o mejorar la condición de acidez edáfica, como así también de la tecnología de aplicación apropiada para el sistema de producción. El diagnóstico de condiciones de acidez edáfica requiere de un abordaje sistémico, integrando y evaluando diferentes factores como el tipo de suelo, cultivo, clima, sistema de labranza, entre otros. Asimismo, la evaluación de la calidad de los fertilizantes y enmiendas aplicadas para mitigar y/o mejorar la reacción del suelo y/o la concentración de cationes básicos es un aspecto fundamental del manejo sustentable de suelos acidificados. El análisis de la eficiencia química (equivalente carbonato de calcio) y física (reactividad o eficiencia granulométrica) en laboratorio es el primer paso para poder definir la aptitud de las rocas portadoras de carbonatos o de otros materiales utilizados (e.g. óxidos, hidróxidos de calcio). El cálculo del PRNT es el principal atributo utilizado para clasificar el corrector químico desde el punto de vista de su eficiencia global para mejorar limitaciones por acidez edáfica. Sin embargo, estos datos deben ser complementados con el análisis de los precios por unidad de PRNT; las dosis reales a aplicar una vez ajustado según el PRNT de la enmienda seleccionada, el costo de aplicación por hectárea; la cantidad total a aplicar en el campo, entre otros indicadores relevantes.

El manejo de fertilizantes y enmiendas en ambientes acidificados de la Región Pampeana bajo sistemas de siembra directa representa un gran desafío tecnológico derivado de la baja eficiencia agronómica de los correctores tradicionales (i.e. calizas y dolomías), debido a la baja solubilidad en agua de los materiales calcáreos y la no incorporación o mezcla de la enmienda con el suelo debido a la ausencia de

labranza. La aplicación combinada de las rocas carbonáticas con yeso representa una práctica recomendable para mejorar la solubilización en los primeros centímetros del suelo. Asimismo, dosificación de bajas dosis y aplicaciones frecuentes a lo largo de las secuencias de cultivos y/o rotaciones permite maximizar la efectividad agronómica de las enmiendas calcáreas.

## Bibliografía

- Álvarez, C, PL Fernández y HS Steinbach. 2015. Limitantes de la capacidad productiva de los suelos. En: Fertilidad de suelos y fertilización en la región pampeana. Capítulo 2. R. Álvarez (editor). p 17-45.
- Echeverría, HE; HR Sainz Rozas; P Calviño y P Barbieri. 2007. Respuesta del trigo al encalado. En: <http://www.econoagro.com/verArticulo.php?contenidoID=127>.
- Espinosa, J y E Molina. 1999. Acidez y encalado de los suelos. 1º Edición. IPNI. 46 p.
- Herrmann, C. 2018. Rocas y minerales como fertilizantes de suelos agrícolas. *Ciencia Hoy*. 27(158):11-19.
- Herrmann, C. y M Torres Duggan. 2016. Fertilizantes y enmiendas de origen mineral: caracterización y uso en la Argentina. En: Suelos y Geología Argentina. 2016. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Capítulo 13. Pereyra, F.X y M. Torres Duggan (editores). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACs). Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV). p 329-355.
- Machetti, N; P Gelati; D Ferro; Z Nicora; C Lucentini; R Balbuena; M Mur y ME Vázquez. 2016. Efecto del encalado y tránsito agrícola sobre propiedades físicas y su relación con el rendimiento. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba (actas en CD).
- Rodríguez, MB y M Torres Duggan. 2015. Caracterización de los fertilizantes, enmiendas, abonos y su calidad agronómica. En: Fertilidad de suelos y fertilización en la Región Pampeana. Álvarez, R. (ed). Facultad de Agronomía (UBA). 369-400 p.
- Torres Duggan, M. 2007. Calidad de fertilizantes. ¿Cuáles son las principales propiedades y atributos que determinan su valor agronómico? En: Simposio "Fertilidad 2007". "Bases para el manejo de la nutrición de los cultivos y los suelos". Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI) y Fertilizar Asociación Civil. García, F y Ciampiti, I. Editores. 160 pp.
- Torres Duggan, M. y MB Rodríguez. 2016. La fertilidad de los suelos en relación a la edafogénesis. En: Suelos y Geología Argentina. Una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios. Capítulo 11. Pereyra, F.X y M. Torres Duggan (editores). Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (AACs). Asociación Geológica Argentina (AGA). Universidad Nacional de Avellaneda (UNDAV). p 288-312.
- Vázquez, ME; A Terminiello; A Casciani; G Millán; P Galeti; F Guilino; J García Díaz, J Kostirya y M García. 2010. Influencia del agregado de enmiendas básicas sobre la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en ámbitos templados argentinos. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 28 (2):141-154.
- Vázquez, ME y A Pagani. 2014. Calcio y magnesio. Manejo de fertilización y enmiendas. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Parte II. Capítulo 11. Ediciones INTA. p 317-356. Fertilidad 2014
- Vázquez, ME y GJ Millán. 2017. Acidez del suelo. Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En: Manejo y conservación de suelos. ME Vázquez (Editora). Capítulo 8. p 229-306.
- Vázquez, ME; A Terminiello; A Casciani; G Millán; D Cánova; P Gelati; F Guilino; A Dorronzoro; Z Nicora, L Lamarche y M García. 2012. Respuesta de la soja (*Glycine max* Merr) a enmiendas básicas en algunos suelos de las provincias de Buenos Aires y Santa Fe. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 30 (1): 43-55. ◀



# ¿Cómo nutrir sistemas intensificados?

## Aprendizajes de la Chacra Bragado-Chivilcoy

Ignacio Alzueta<sup>1</sup> y Martín Torres Duggan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AAPRESID y Plexagro; <sup>2</sup>TECNOAGRO.

ialzueta@agro.uba.ar

### Introducción

En este artículo intentaremos plasmar la experiencia reciente la Chacra Bragado-Chivilcoy de Aapresid, en cuanto a la necesidad de revisar la manera que venimos manejando nuestros sistemas agrícolas y en particular el manejo nutricional de los mismos, detallando algunos aprendizajes que hemos tenido en estos 4 años, así como plantear algunos vacíos de conocimiento de los mismos para trabajar a futuro. La Chacra Bragado-Chivilcoy de Aapresid, fue conformada por 14 miembros, entre asesores y productores, cuyos establecimientos se ubican en los partidos de Alberti, Bragado, Chacabuco, Chivilcoy, General Viamonte y 25 de Mayo (provincia de Buenos Aires). La percepción de los miembros de la Chacra B-C, era que, los rendimientos promedio de las últimas 10 a 15 campañas, parecieran haber alcanzado un "techo" productivo, sin importantes incrementos en los rendimientos de los principales cultivos de granos, junto a una marcada variación interanual. Sumado a esto, dentro de una misma campaña y de ambientes edafo-climáticos similares, existen importantes diferencias en los rendimientos logrados entre distintos productores o entre distintos lotes con diferente historia productiva. Por lo tanto, resultaba necesario caracterizar la brecha productiva y los causantes de esa brecha a nivel de cada cultivo individual como a nivel del sistema productivo completo, para poder generar estrategias que permitan disminuirla y estabilizar la producción.

Para ello, junto con el Sistema Chacras de Aapresid, se llevó a cabo desde 2014 a la actualidad, un plan de acción que permita cumplir con los objetivos planteados por los miembros de la chacra. Dentro del proyecto primeramente se trabajó en realizar una exhaustiva **caracterización ambiental**, donde se resaltaron las principales características edáficas, climáticas, de los cultivos y su interacción. Destacándose que existe una importante variabilidad edáfica, con presencia de argiudoles **típicos**, natracuoles, hapludoles **típicos** y hapludoles **énticos**; índices productivos

que van desde 45 a 92; y capacidades de uso entre I y IV. En líneas generales, el área abarcada por el grupo presenta temperaturas moderadas, con un amplio período libre de heladas y una oferta de precipitaciones promedio cercana a los 1000 mm anuales, bajo un régimen isohigro sin una estacionalidad marcada a lo largo del año. Estas características hacen que la zona en la que se encuentra la regional Bragado-Chivilcoy presente condiciones edafo-climáticas propicias para alcanzar rendimientos estables a lo largo del tiempo e incrementarlos hasta valores más cercanos a los potenciales de cada cultivo.

Paralelamente, se trabajó fuertemente en evaluar detalladamente para cada uno de esos ambientes los sistemas agrícolas más difundidos y se los comparó con alternativas que presentaban un mayor grado de **intensificación**. Si bien esta línea de trabajo aún continúa siendo analizada, parcialmente se puede destacar que sistemas más intensificados logran mantener nuestros lotes "trabajando" por más tiempo y a su vez, incrementan la productividad total, mejorando aportes de C, la captura de recursos y el resultado económico. Sin embargo, no todos los ambientes pueden ser intensificados de la misma manera, dado que cada uno de ellos presenta limitantes diferentes, como puede ser alto riesgo de anegamiento para los cultivos invernales en la zona este de la regional, o déficits hídricos muy marcados en los suelos más arenosos de la región durante el verano.

Simultáneamente, se realizó un análisis de **brecha a nivel de cultivo individual**, del mismo se pudo observar que podemos incrementar la productividad del sistema ajustando el manejo tecnológico de cada uno de los cultivos, siendo el **manejo nutricional** de cada cultivo uno de las principales causales de esa brecha. Dado que se han observado grandes deficiencias de nitrógeno (N) en gramíneas y fósforo (P) en todos los cultivos y es necesario prestar atención a posibles deficiencias de otros meso y micronutrientes (S, Zn, Ca, K).

Otro punto destacable del proceso de aprendizaje de estos últimos años es considerar a los **cultivos de cobertura o de servicio invernales**

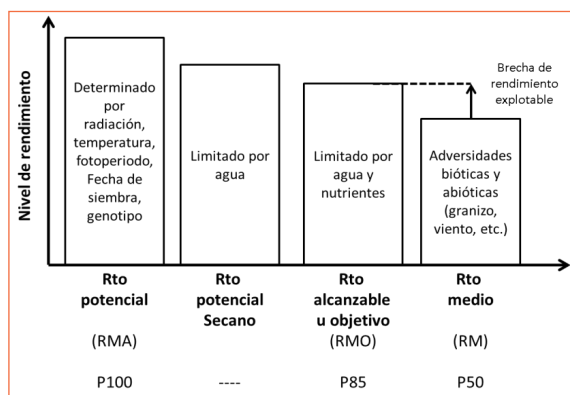
como una herramienta clave a la hora de intensificar el sistema y potenciar la productividad del mismo. Hemos observado que este tipo de cultivos, no penalizan el rendimiento de mi cultivo estival, de hecho, suele incrementarlo, sumado a una mejora sustancial el aporte total de carbono (C) y **ciclado de nutrientes, como el N y probablemente otros** al sistema y colaborando notablemente en la supresión de malezas, por lo que se puede reduciendo marcadamente el uso de herbicidas, reduciendo tanto costos como el impacto ambiental de estos sistemas.

A continuación, intentaremos profundizar sobre algunos de los puntos resaltados en la introducción, como la brecha productiva a nivel de cultivo individual, el balance de nutrientes, el aporte de los cultivos de servicio y cómo podemos diagnosticar y tomar decisiones en sistemas agrícolas que necesitan ser reformulados.

### La brecha productiva a nivel de cultivo individual

Como se planteó anteriormente, dado que entre los miembros de la Chacra Bragado-Chivilcoy existía la percepción que, tanto para cultivos estivales como invernales, no se está aprovechando el potencial productivo y que existe una brecha considerable entre los rendimientos logrados y los rendimientos máximos alcanzables, se plantea la necesidad de conocer en principio la magnitud de esa brecha y luego sus posibles causas para así poder diseñar estrategias para reducirla. Se entiende por rendimiento potencial al rendimiento obtenido por un genotipo determinado que crece sin limitantes hídrica y nutricional, libre de malezas, plagas y enfermedades, bajo la implementación de buenas prácticas agronómicas (Van ittersum y Rabbinge 1997). El rendimiento máximo alcanzable es aquel logrado por un cultivo que crece sin limitantes nutricionales y utilizando la mejor combinación de insumos y tecnología, pero merced a las precipitaciones locales (Lobell et al., 2009). En la generación del rendimiento interactúan diferentes factores, que según su grado de importancia hacen que el rendimiento alcance niveles cercanos al potencial o a los máximos alcanzables. Los rendimientos promedio a escala de producción resultan inevitablemente menores que los potenciales, ya sea porque alcanzar estos niveles requiere un manejo de cultivo óptimo logísticamente difícil de asegurar a escala respecto al control de plagas, malezas,

enfermedades, nutrición, elección de genotipos y arreglo espacial; o porque alcanzar estos niveles de rendimiento no resulta rentable (Lobell et al., 2009). De este modo, se ha observado en diversos trabajos que los rendimientos promedio tienden a lograr un máximo próximo al 75% a 85% del rendimiento potencial o del máximo alcanzable limitado por la oferta de agua (van Wartel et al., 2013; van Ittersum, 2013). Por lo tanto, es fundamental determinar si en un determinado ambiente, el “estancamiento” en los rendimientos se debe a que se está alcanzando esos niveles productivos cercanos al 80% o se debe a la presencia de otros factores como la degradación de los suelos, o a un manejo tecnológico inadecuado (**Figura 1**). Por lo que si no se ha alcanzado el máximo rendimiento alcanzable con (80%), a futuro, un posible incremento productivo dependerá de la incorporación de tecnologías y el desarrollo de estrategias de manejo para incrementar los rendimientos por unidad de superficie, haciendo un uso más eficiente de los recursos (radiación, agua, nutrientes), pero al mismo tiempo reducir los efectos negativos sobre el ambiente (Salvagioti, 2009). Para poder diseñar estas estrategias es necesario conocer la magnitud de la brecha entre los rendimientos actuales o logrados y los rendimientos potenciales o los máximos alcanzables (ej. limitados por agua), así como de la posibilidad de identificar las causas que provocan esa brecha (Lobell et al., 2009).



**Figura 1.** Niveles de rendimiento abordados en este trabajo. Rendimiento potencial (RMAX), rendimiento limitado por agua, rendimiento medio objetivo (limitado por agua y nutrientes; RMO) y rendimiento medio (RM). Se indica el valor de probabilidad acumulada que determina cada uno de los niveles de rendimiento y se define a la brecha explotable de rendimiento como la diferencia entre el RMO y RM (RMO-RM). Adaptado de: Van Ittersum (2013).

Para la región pampeana se han estimado rendimientos potenciales de trigo entre 5000 y 7300 kg/ha (Menéndez y Satorre, 2007), entre 6000 y 8000 kg/ha para soja (Manilla y Salvagiotti, 2012; Specht, 1999), y cercanos a los 17500 kg/ha para maíz (Salvagiotti, 2009). De acuerdo estimaciones recientes llevadas a cabo por el proyecto Global Yield Gap Atlas (GYGA; 2013), considerando las características edafo-climáticas de la zona en que se encuentra la regional Bragado-Chivilcoy, los rendimientos potenciales (sin limitaciones) promedio de distintas campañas estaría entre los 13600 y 16700 kg/ha para maíz, entre 6300 y 7300 kg/ha para soja y entre 7000 y 8300 kg/ha para trigo. Los rendimientos máximos alcanzables (limitados sólo por oferta de lluvia estarían entre los 11600 y 12400 kg/ha para maíz; entre los 3700 y 4900 kg/ha para soja y entre 5300 y 6800 kg/ha para trigo. Las diferencias en el rango se deben a las localidades (y características edafo-climáticas representativas) utilizadas como referencia para la estimación. Considerando las localidades de referencia más cercanas para cada establecimiento, los rendimientos potenciales estimados por el proyecto GYGA (2013) para cada localidad, los rendimientos los máximos obtenidos por productores en la regional, y los rendimientos promedio de al menos 10 campañas, los niveles productivos actuales estarían aún lejos del 80-85% del potencial. A nivel de los miembros de la Chacra Bragado-Chivilcoy, existía la percepción de que parte de esta brecha y de las variaciones productivas podrían ser explicadas a partir de posibles limitantes químicas y físicas de los suelos en cada uno de los distintos ambientes caracterizados previamente. De acuerdo a lo expresado por técnicos y productores, parte de estas limitantes podrían estar asociadas a los modelos productivos actuales, con rotaciones con predominio de soja de 1<sup>ª</sup> y criterios de fertilización de suficiencia o que apunten a maximizar el margen del cultivo en esa campaña. Estas observaciones son coincidentes con estudios recientes que sugieren que el deterioro físico y químico de los suelos, producto de rotaciones agrícolas con bajos aportes de C,

podrían estar limitando los niveles productivos en la región pampeana (Bacigaluppo et al., 2011; Sasal, 2012).

Para responder estas interrogantes, se realizaron dos tipos de análisis: (i) a través de una base de datos con información histórica de lotes de producción, y (ii) mediante ensayos a campo. La base de datos se realizó con información histórica de los lotes de producción de soja (1ra y 2da), trigo y maíz (temprano y tardío) pertenecientes a la Chacra Bragado-Chivilcoy, sembrados entre las campañas 2006/07 y 2016/17 (Tabla 1). Esta base contó con información de cada lote sobre rendimiento, campaña, tipo de suelo, cultivo antecesor, fecha de siembra, genética, fertilización fosforada. Se caracterizó la Brecha Productiva en valores absolutos ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) y en valores relativos (%) como:

$$\text{- Brecha } (\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}) = \text{RMO} - \text{RM} \quad [\text{Ec.1}]$$

$$\text{- Brecha } (\%) = 1 - (\text{RM} / \text{RMO}) \quad [\text{Ec.2}]$$

donde, RM es el rendimiento medio (P50) de los lotes en cada campaña en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , y RMO es el rendimiento medio objetivo (P85) en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . P85 y P50, son los percentiles 95% y 50%, respectivamente. Para el RMA, se utilizó el percentil 100% (van Ittersum, 2013).

El análisis mediante ensayos a campo, se llevó a cabo durante las campañas 2014/15 a 2016/17, realizando 11 ensayos de campo en franjas sin repeticiones en diferentes establecimientos de la Chacra B-C con diferentes tipos de suelos. En cada ensayo se realizaron dos tratamientos. Al primero de ellos lo denominamos Tecnología Ajustada (TA), donde se buscó con el manejo agronómico que el cultivo no tenga limitaciones nutricionales y reducir al mínimo la incidencia de factores reductores. El rendimiento obtenido en esta franja fue análogo al RMO obtenido por el análisis de base de datos. El otro tratamiento fue denominado Tecnología del Productor (TP), que buscó reproducir el manejo agronómico

**Tabla 1.** Detalle de la base de datos generada con información histórica de lotes de los miembros de la Chacra Bragado-Chivilcoy. Número de lotes y campañas analizadas para cada cultivo.

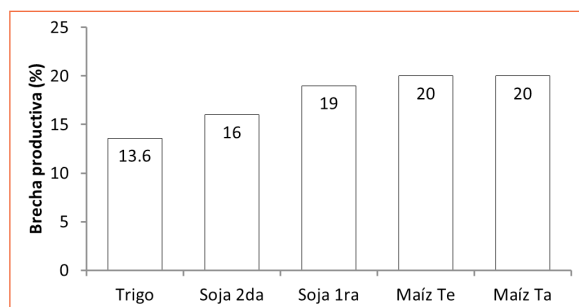
Cultivo	Soja 1ra	Soja 2da	Trigo	Maíz Temprano	Maíz tardío
# casos	1263	326	286	459	147
# campañas	2007/15	2007/15	2007/16	2007/15	2007/15

promedio actual de los cultivos analizados; el rendimiento obtenido bajo este tratamiento fue análogo al RM obtenido en el análisis mediante base de datos. De este análisis destaca que los miembros de la Chacra B-C, aún podrían mejorar la productividad a través de ajustes del manejo agronómico, siendo los potenciales de mejora de 12% en trigo, 16 y 19% en soja de segunda y primera y 20% tanto en maíz temprano como tardío (Figura 2).

Si bien en todos los cultivos se observó que la campaña agrícola, por sus características climáticas, fue una de las principales causas de la variabilidad productiva del cultivo en cuanto rendimientos máximos y medios alcanzados, todavía existe una parte de esa variabilidad sobre la que podemos actuar. Para ello es necesario diseñar estrategias de manejo que nos permitan disminuir la brecha y variabilidad intra e inter-anual. Entre estas posibles estrategias, es una constante la correcta elección del lote en cuanto a su antecesor; por ejemplo, el cultivo de soja previo a trigo; el doble cultivo trigo/soja de segunda previo a maíz y este último previo a soja de primera; y una generalidad utilizar fechas de siembra tempranas y cultivares o híbridos modernos de alto potencial de rendimiento, sumado a realizar un planteo de reposición de fósforo y niveles de N alcanzado mayores a los que se venían utilizando, 150-160 kg N/ha (suelo + fertilizante) en trigo y maíz temprano.

### Balance de nutrientes en nuestros sistemas agrícolas

La nutrición del cultivo pudo ser analizada solamente focalizando en el manejo del N y del P, dado que casi no se tienen en cuenta otros nutrientes como azufre (S), zinc (Zn), etc. El mismo

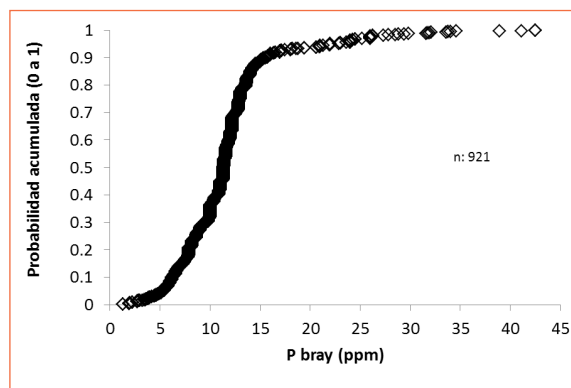


**Figura 2.** Brecha productiva explotable porcentual (P85-P50), para los cultivos de trigo, soja de 2da, soja de primera, maíz temprano y tardío.

es muy representativo del manejo nutricional que se viene realizando en la zona desde hace algún tiempo. Una de las primeras situaciones a remarcar es el nivel de diagnóstico (análisis de suelo) que se realiza, el 85% de los miembros lo utiliza en sus cultivos invernales a la hora de planificar la nutrición del cultivo, mientras que en los cultivos estivales el grado de adopción de esta tecnología de proceso es del 60% en maíz temprano y 30% en el cultivo de soja de primera.

Uno de los resultados más contundentes en cuanto a que nuestro sistema agrícola está siendo manejado deficitariamente desde lo nutricional surge de la observación del contenido de P de los lotes. De 921 casos analizados entre todos los cultivos de granos, el percentil 50% fue de 11,3 ppm, con un 90% de ellos con valores menores a 15,5 ppm (Figura 3). Estos resultados son preocupantes dado que los niveles de P en suelo deseados para no encontrar limitaciones marcadas al rendimiento, deberían encontrarse cercanos a los 22-25 ppm (García, 2017).

Los niveles de P en suelo que estamos observando es consecuencia de que el aporte de P que estamos realizando es claramente menor al que estamos extrayendo. Si realizamos un cálculo entre el aporte que estamos realizando y le restamos el P extraído con los granos (estimado en base a los niveles de rendimiento; IPNI 2009) nos da como resultados un balance aparente del nutriente. En el caso del P, solemos encontrar balances negativos en el caso de la soja de primera ( $-14 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) y los maíces tempranos como tardíos ( $-7 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), mientras que en el caso del trigo observamos un balance positivo ( $12 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ ; Figura 4). Esto

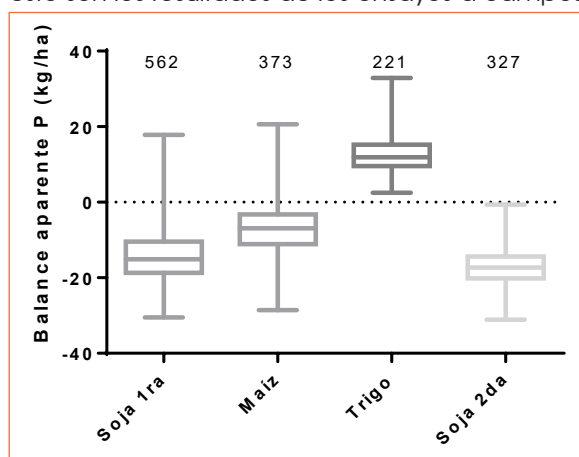


**Figura 3.** Probabilidad acumulada del nivel de fósforo Bray en suelo (ppm) de los lotes de trigo, maíz y soja analizados por los miembros de la Chacra Bragado-Chivilcoy.



último sería un síntoma positivo pensando en el objetivo de ir restituyendo este nutriente gradualmente para mejorar la "salud" de nuestros suelos, sin embargo, la mayoría de estos lotes fueron destinados a soja de 2<sup>da</sup>, cultivo en el cual es muy poco frecuente la aplicación de P. Por lo tanto, si consideramos que el cultivo de soja extrae 5 kg P·ha<sup>-1</sup> (IPNI, 2009) y esperamos un rendimiento de soja de 2<sup>da</sup> mínimo en nuestra región de 3000 kg·ha<sup>-1</sup>, la misma extraería unos 15 kg P·ha<sup>-1</sup>, provocando que el balance aparente sea neutro o levemente negativo, para el doble cultivo.

En cuanto al manejo nitrogenado, las situación es similar a la observada en P, los aportes que se realizan al sistema, son claramente menores a los que se extraen, consecuencia de la utilización masiva de modelos de suficiencia, donde se prioriza maximizar el resultado económico sin tener en cuenta el efecto sobre la "salud" del suelo en el medio a largo plazo, ya que los cultivos dependen en buena parte de la caja de N que le aporta el suelo a través de la mineralización de la materia orgánica, parámetro que también ha mostrado disminuciones marcadas en los últimos años. Esta disminución en el contenido de la MO, ha provocado que el aporte de la mineralización haya disminuido y, consecuentemente, los cultivos de gramíneas (principalmente maíz), muestren respuesta a la fertilización en niveles por encima de los umbrales de años atrás. Una prueba de esto son los resultados de los ensayos a campos



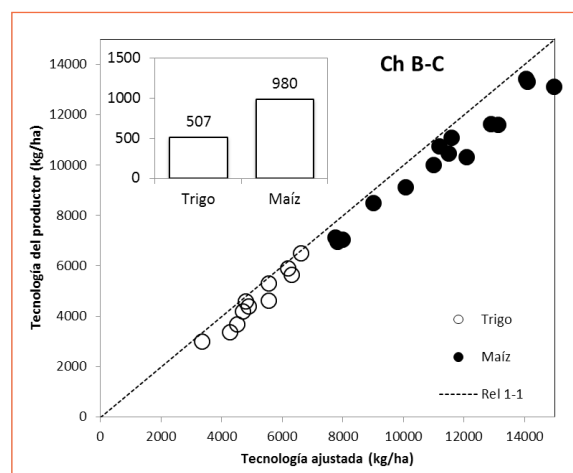
**Figura 4.** Balance aparente de P de los lotes pertenecientes a los miembros de la Chacra Bragado-Chivilcoy para el periodo 2007-2015. Las cajas representan los percentiles 75, 50 y 25, mientras que los bigotes de las cajas indican el percentil 10 y 90 de cada serie de datos analizada.

realizados en la Chacra Bragado- Chivilcoy, donde se encontró respuesta significativa en 15 ensayos donde se comparó el manejo medio del productor (TP) con un manejo ajustado a altos rendimientos (TA) donde la diferencia principal fue la nutrición nitrogenada en ambos cultivos (+30-40 kg N/ha; **Figura 5**). Coincidiendo con otros autores que sugieren que los niveles nutricionales actuales de los suelos de la región, producto de balances negativos de elementos como N, P, K y S generados por estrategias de fertilización conservadoras y apuntadas a un único cultivo, podrían estar limitando los rendimientos (Ferraris y Couretot, 2009; Torres Duggan y Rodríguez, 2014).

A lo anteriormente expuesto debemos también considerar que los balances de C en el suelo tienden a ser negativos en las rotaciones más difundidas de la región pampeana (Bacigaluppo et al., 2011; Sasal, 2012; Andrade et al., 2015; Agosti et al., 2017 y Alzueta et al., 2018), provocando que actualmente nuestros suelos presentan un gran nivel de degradación no solo química, sino también física, siendo esto uno de los principales causante de la brecha productiva y ese techo productivo con el cual nos hemos encontrado.

### Repensando nuestros sistemas agrícolas

Como se detalló anteriormente, entre los miembros de la Chacra Bragado-Chivilcoy, existe la percepción de que una de las causas de la



**Figura 5.** Relación entre el rendimiento (kg/ha) de trigo y maíz bajo manejo ajustado (TA) y el manejo medio del productor (TP). La línea punteada es la relación 1:1 o de iso-rendimientos. El *inset* muestra el promedio de respuesta entre ambos manejos para trigo y maíz.

brecha y variabilidad productiva existentes, podrían ser explicadas a partir de posibles limitantes químicas y físicas de los suelos de los distintos ambientes, asociadas a los modelos productivos actuales, con rotaciones con predominio de soja de 1ª y criterios de fertilización de suficiencia o que apunten a maximizar el margen del cultivo en esa campaña. Estas observaciones son coincidentes con estudios recientes que sugieren que el deterioro físico de los suelos, producto de rotaciones agrícolas con bajos aportes de C, podrían estar limitando los niveles productivos en la región pampeana (Bacigaluppo et al., 2011; Sasal, 2012). Rotaciones más intensas y con mayor proporción de gramíneas que las utilizadas tradicionalmente permitirían mayores aportes de rastrojo y de C (Studdert y Echeverría, 2000), y mejoras en la estructura del suelo y el balance de agua (Sasal, 2012; Doran y Parkin, 1994; Havlin, 1990), contribuyendo a estabilizar la producción y elevar los rendimientos, y a aumentar la eficiencia en el uso de recursos (Caviglia et al., 2004).

A su vez, la utilización de estrategias de fertilización a mediano-largo plazo, con criterios de reposición y reconstrucción de nutrientes ha demostrado un incremento en los rendimientos alcanzados en cultivos individuales como maíz y soja (Ferraris y Couretot, 2009) y un incremento en la producción acumulada de grano de las rotaciones (Ferraris et al., 2012). A su vez, se ha observado que estrategias de manejo tecnológico que combinen la aplicación de micronutrientes, fungicidas foliares e inoculación con fijadores y promotores de crecimiento contribuyen a aumentar los "techos productivos" (Ferraris y Couretot, 2012). En ensayos de larga duración de la región Sur de Santa Fe (CREA-IPNI), se han observado rendimientos cercanos a los potenciales para soja y maíz utilizando estrategias que combinen una mayor intensificación de cultivos con criterios de fertilización de reposición/reconstrucción y un manejo tecnológico intensivo (Boxler, 2013; Lagos et al., 2013).

Por lo tanto, en base a lo expuesto anteriormente, se plantea la necesidad de implementar mejoras a nivel "sistema productivo", para ello creemos que es necesario centraremos principalmente sobre los pilares de la intensificación y diversificación de cultivos; apoyados por un manejo de la nutrición de los mismos pensada desde el punto de vista sistémico. A partir de esto, dentro de la Chacra Bragado-Chivilcoy se viene trabajando desde la campaña 2013/14 a la actualidad, en un plan de acción donde se

están evaluando el efecto a medio-largo plazo de intensificar, diversificar y nutrir nuestros cultivos con un enfoque sistémico. **Siendo los principales resultados parciales, que podemos incrementar la productividad del sistema ajustando el manejo tecnológico (nutricional) de cada uno de los cultivos; que las rotaciones más intensas lograron ocupar el suelo con cultivo vivo por más tiempo y lograron maximizar el rendimiento global, provocando una mejora en el aporte de C y la captura de recursos (i.e. nutrientes, agua, etc.) con un mejor resultado económico.** A su vez, en estos ensayos ha resurgido la incorporación de **cultivos de cobertura o de servicios** como herramienta para intentar llevar a cabo exitosamente un sistema agrícola competitivo y sustentable, dado que estos pueden tener un efecto positivo sobre el sistema; como, por ejemplo, incrementando el aporte de C, mejorando el ciclado de nutrientes y agua, suprimiendo malezas, reduciendo la erosión, etc.

### **Inclusión de cultivos de cobertura al sistema**

Una agricultura sostenible en el tiempo puede describirse como aquella que, a través de la gestión de tecnologías ecológicamente racionales, se enfoque no solamente en la obtención de altos rendimientos de un producto en particular, sino en la optimización del sistema en su conjunto. Actualmente, el proceso de agriculturización registrado en los sistemas agrícolas de la región pampeana y el aumento de hasta un 80 % de la superficie agrícola dominada por cultivos continuados de soja ha llevado a pérdidas en la cobertura de los suelos aún en sistemas de siembra directa.

A su vez el incremento de la superficie con cultivos de verano, y la intensificación en los planteos ganaderos (más silos y/o rollos), sumado a la coyuntura productiva actual, han provocado una disminución marcada en el área de producción de los mismos y, consecuentemente, un significativo cambio en los aportes de C al suelo. Estos cambios exponen al sistema agrícola a grandes pérdidas de su potencialidad productiva, principalmente por la degradación de sus suelos. En este contexto, la inclusión de cultivos de cobertura o servicio en la rotación aparece como una oportunidad para mitigar y/o revertir una serie de procesos que pueden condicionar la sostenibilidad de los sistemas de producción, complementando y/o suplementando la producción de cultivos invernales.

Se define cultivo de cobertura o de servicio (CS) a *“una cobertura vegetal viva que cubre el suelo y que es temporal o permanente, el cual está cultivado en asociación con otras plantas (intercalado, en relevo o en rotación)”*. Esto es, todo cultivo que se siembre entre dos cultivos sucesivos, que no tiene un valor económico en sí mismo, pero que brinda un servicio eco-sistémico y agrega valor al cultivo siguiente, que es el de interés económico.

Según Kruger y Quiroga (2013), existen un gran número de razones por las que podemos incorporar a los CS en nuestros sistemas, por ejemplo: mejorar el balance de C; fijar N para reducir los requerimientos de fertilizantes; atenuar las pérdidas de suelo por erosión eólica e hídrica; disminuir la presión de malezas y el uso de herbicidas; mejorar la captación de agua y reducir encharcamientos/encostramiento; mejorar transpirabilidad; reducir riesgos de salinización por ascenso capilar desde napas; reducir evaporación incrementando la eficiencia de conservación y disponibilidad de agua en el perfil; disminuir la lixiviación de nutrientes; disminuir la susceptibilidad a la compactación.

Si bien, las ventajas que presentan los CS son muchas y con objetivos variados, existen algunas “desventajas” que deberían tenerse en cuenta. Por ejemplo, se reconoce que el consumo hídrico de éstos durante el invierno interferiría en la normal oferta de agua para el cultivo siguiente, podría generar problemas de implantación en los cultivos siguientes, como también ser hospedante de diferentes plagas y enfermedades.

Si bien, de acuerdo a la definición de cultivos de cobertura cualquier especie puede ser utilizada como tal, existe un grupo de ellas que son las más comúnmente usadas, de acuerdo a la finalidad que se esté buscando en cada sistema productivo particular. Dentro de las gramíneas, donde se persigue el objetivo principal de aportar C al suelo, las más comúnmente usadas como CS son: Avena, Centeno, Triticale, Raigrás; mientras que entre las leguminosas que tienen como uno de sus principales objetivos cubrir parte del requerimiento de N de los cultivos estivales sembrados posteriormente a su secado, se encuentran vicias y tréboles.

Actualmente existe un gran desconocimiento de cómo manejar adecuadamente este tipo de cultivos (CS) y los posteriores de cosecha, para no provocar efectos negativos sobre estos últimos. Algunas de las cuestiones claves en el

manejo de los CS son las fechas de siembra e interrupción de los mismos, así como el manejo nutricional, ya que condicionan la productividad de MS, el consumo de agua, su capacidad de competir con malezas, aportar C, etc. También otras cuestiones como realizar una correcta inoculación y cuanto N pueden aportar los CS de leguminosas (i.e. vicias, tréboles, etc.).

Para no provocar un efecto negativo en los cultivos estivales posteriores es clave un seguimiento exhaustivo del agua en el perfil, conocer la probabilidad de recarga de la zona de producción y manejar pronósticos climáticos sumado a un adecuado manejo nutricional. Respecto a este punto es sabido que CS de leguminosas pueden aportar cantidades significativas de N a los cultivos siguientes (i.e. maíz y posterior trigo), pero existe poca información disponible para Argentina sobre cuánto podría llegar a ser el valor alcanzado. Dentro del Sistema Chacras de Aapresid se vienen realizando diferentes evaluaciones de este tipo y se ha observado que por ejemplo un maíz tardío con antecesor vicia puede llegar a absorber durante su ciclo hasta 62 kg N/ha más que un maíz tardío que tuvo un barbecho químico como antecesor (Kehoe et al., 2017), mientras que en la Chacra Bragado-Chivilcoy hemos observado niveles en R1 (periodo crítico) de un maíz temprano con antecesor vicia consociada con centeno hasta 25 kg N/ha disponibles en el suelo más, que comparado a uno que venía de barbecho químico. De hecho, un trabajo de tres años de duración la Chacra Pergamino de Aapresid, donde compararon diferentes antecesores para maíz tardío han observado que con niveles de productividad de vicia de alrededor de 4500 kg MS/ha, luego no se observa respuesta a la fertilización nitrogenada.

Es esperable que ese aporte de N extra que realiza el CS basado en leguminosas repercute de manera positiva en el rendimiento del cultivo posterior si el agua no fue un limitante importante. Un ejemplo de ello se puede observar en la **Figura 6**, donde los cultivos de maíz tardío con antecesor CS rindieron en promedio 1.3 t/ha más que los provenientes de barbecho químico.

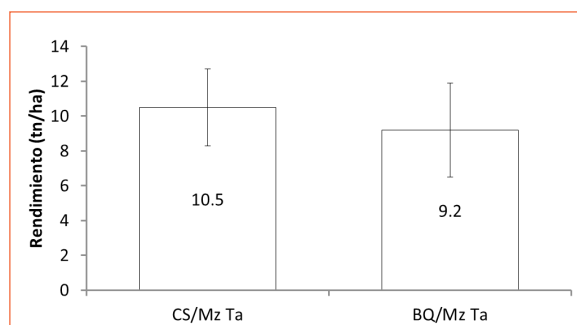
En cuanto al manejo de CS previo a soja, en general se utilizan gramíneas como el centeno, avena, trigo o cebada, los cuales aportan C y un buen control de malezas al sistema. Pero algunos trabajos sugieren que el manejo nutricional de esos CS es clave a la hora de evaluar el impacto sobre el posterior cultivo de soja. En general se encuentran rendimientos levemente

deprimidos en comparación con una situación de barbecho cuando ese CS no ha sido fertilizado o solamente se le ha agregado un arrancador (i.e. 90 kg MAP/ha). El grupo CREA Ascensión ha observado respuesta en el rendimiento de la soja que van desde los 50 a 400 kg/ha, cuando al CS de gramínea se los fertilizo con 50 a 150 kg Urea/ha (Permingeat et al., 2017). Esto es explicado parcialmente por un incremento en la generación de biomasa aérea y radical, que provoca mejoras en la infiltración del suelo y un mejor ciclado de nutrientes.

A pesar de que hay indicios sobre los aportes nutricionales que dan los CS y de qué manera interactúan con el resto del sistema, lo cierto es que hoy día existe un vacío de conocimiento en cuanto aportan estos CS a la MO del suelo, el P orgánico y otros nutrientes esenciales para los cultivos, y las interacciones entre ellos y la microbiología del suelo. Será importante a futuro poder diagnosticar estos sistemas y plantear un enfoque sistémico para manejar la nutrición de sistemas intensificados.

### Comentarios finales

De lo aprendido durante estos años de trabajo, surge que para maximizar la competitividad de nuestros sistemas de manera sustentable, debemos dejar de pensar únicamente en los cultivos de manera individual y comenzar a pensar en el sistema completo, por lo tanto, debemos trabajar en el corto plazo, pero pensando en el mediano a largo plazo y considerando que las principales herramientas con las que contamos son la intensificación de cultivos, sean de granos o combinados con cultivos de servicios, de acuerdo a las limitantes de mi ambiente y pensando en nutrir el sistema y no solamente fertilizar mis cultivos.



**Figura 6.** Rendimiento (t/ha) de maíz tardío (Mz Ta) con antecesor CS (Vicia o Vicia + Centeno) o barbecho químico (BQ) (n:24).

### Bibliografía

- Agosti MB. et al.** 2017. Hacia una producción sustentable real. Resumen de resultados Chacra Pergamino 2011-16. Sistema Chacras. Aapresid.
- Alzueta I. et al.** 2018. ¿Qué aprendimos en los últimos 4 años sobre la intensificación de los sistemas agrícolas? Taller de resultados de la Chacra Bragado-Chivilcoy de Aapresid. 20 de noviembre de 2018. Sistema Chacras. Aapresid.
- Andrade, J.F.; Poggio, S.L.; Ermácora, M.; Satorre, E.H.** 2015. Productivity and resource use efficiency in intensified systems in the Rolling Pampa, European Journal of Agronomy 67 (2015) 37-51.
- Andriulo, A., Guérif, J., & Mary, B.** 1999. Evolution of soil carbon with various cropping sequences on the rolling pampas. Determination of carbon origin using variations in natural  $^{13}\text{C}$  abundance. Agronomie, 19(5), 349-364.
- Bacigaluppo, S.; Bodrero, M.; Balzarini, M.; Gerster, G.; Andriani, J.; Enrico, J.; Dardanelli, J.,** 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-filled systems, European Journal of Agronomy 35 (2011) 247– 254.
- Boxler, M.** 2013. El manejo de nutrientes según los asesores. Zona Centro. 2013. Actas del Simposio de Fertilidad. International Plant Nutrition Institute. 22 y 23 de Mayo de 2013, Rosario.
- Caviglia O.P., Sadras V.O. and Andrade F.** 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean.
- Doran J.W. y T.B. Parkin.** 1994. Defining and assessing soil quality. In: Doran et al. (Eds). Defining soil quality for a sustainable environment.
- Ferraris, G; Couretot, L.** 2009. Soja ¿Qué estrategia de fertilización adoptamos? Ensayo de larga duración en la secuencia maíz – soja - cebada/soja -trigo/soja.Arribeños, partido de general arenales campaña 2007/08.
- Ferraris, G; Toribio, M; Falconi, R y Couretot, L.** 2012. Efectos de diferentes estrategias de fertilización sobre los rendimientos y el balance de nutrientes. Comunicaciones IPNI IAH 6 - Junio 2012. 6pp.
- García F.** 2017. Claves para el manejo de la nutrición. Jornada Regional Bragado-Chivilcoy.
- IPNI, International Plant Nutrition Institute.** 2009. Requerimientos nutricionales de los cultivos.



- Archivo Agronómico N° 3. 4pp.
- Kehoe E., Agosti M.B., Enrico J., Prieto G. y Salvagiotti F.** 2017. Respuesta a la fertilización con N según cultivos invernales previos en una secuencia Maíz tardío-Trigo. Para mejorar la producción #56. INTA EEA Oliveros 2017
- Kruger H.; Quiroga A.** 2013. La "interfase suelo-atmósfera" y su valor estratégico en regiones semiáridas. En: Contribución de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción.
- Lagos, J; Gallo, S.; Rodríguez, S.; Boxler, M; García, F. y A. Correndo.** 2013. Hacia los 80 quintales de soja en el Sur de Santa Fe. Campaña 2012/13. Comunicaciones CREA-IPNI.
- Lobell, D., Cassman, K., Field, C.** 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34:4.1-4.26.
- Manlla, A. y Salvagiotti, F.** 2012. Rendimiento potencial y brechas de producción en soja bajo condiciones de campo, en Oliveros, Sur de Santa Fe. Boletín "Para mejorar la producción" N° 48 – INTA EEA Oliveros.
- Menéndez, F. J., & Satorre, E. H.** (2007). Evaluating wheat yield potential determination in the Argentine Pampas. *Agricultural Systems*, 95(1), 1-10.
- Permingeat et al.** 2017. Los Cultivos de Cobertura como Tecnología de Procesos. JAT CREA Ascensión 2017.
- Salvagiotti, F.** 2009. Rendimientos potenciales en maíz. Brechas de producción y prácticas de manejo para reducirlas.
- Sasal, MC.** 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Tesis de Doctorado de la Universidad de Buenos Aires.
- Specht, J.E., Hume, D.J., Kumudini, S.V.** 1999. Soybean Yield Potential--A Genetic and Physiological Perspective.
- Studdert, G.A. y H.E. Echeverría.** 2000. Crop rotation and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Torres Duggan M. y Rodríguez M.** 2014. Fertilización azufrada en la argentina: ¿qué conocemos y qué falta conocer? XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014.
- Van Ittersum MK, Rabbinge R.** 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.* 52:197-208
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z.** 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
- Van Wart, J., Kersebaum, K. C., Peng, S., Milner, M., & Cassman, K. G.** 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research*, 143, 34-43. ◀

# Identificación de factores limitantes del rendimiento de una secuencia de cultivos

Pilar Etchegoimberry y Oswaldo Ernst

Facultad de Agronomía, UdelaR. Paysandú, Uruguay  
pilaretda@gmail.com

## Introducción

El incremento en la demanda de alimentos y energía esperado para el 2050 requiere aumentar la producción agrícola. Dos de las estrategias planteadas para lograr este incremento de producto por unidad de superficie son: i) la intensificación en el uso del área cultivada, sembrando 2 o 3 cultivos por año, y ii) la disminución de la brecha de rendimiento de cada cultivo (Bruinsma, 2009). Sin embargo, la implementación de la primera opción, si bien aumenta el rendimiento de la secuencia, en general se asocia con menores rendimientos de los cultivos individuales (Hochman et al., 2014; Fletcher et al., 2011).

El principal objetivo de los estudios de brecha de rendimiento ( $Y_g$ ), ha sido cuantificar el efecto del ambiente sobre el rendimiento potencial ( $Y_p$ ), el rendimiento alcanzable ( $Y_{alc}$ ) y el rendimiento actual ( $Y_{ac}$ ) de un cultivo individual. Este enfoque no considera la  $Y_g$  global de sistemas con secuencias diversas, ni el impacto de las propiedades de suelo como limitantes del  $Y_{alc}$ . Para condiciones climáticas que permiten implementar más de un cultivo por año, es necesario optimizar la productividad de todo el sistema, en lugar de maximizar la producción de cada cultivo de forma individual. Por lo tanto, es necesario analizar la  $Y_g$  para el sistema en su conjunto.

A través de la agricultura de precisión, es posible evaluar el impacto de las propiedades de suelo en el  $Y_{alc}$  y la  $Y_g$  de una secuencia de cultivos, pudiendo integrar la variabilidad espacial y temporal del rendimiento. Para una chacra en particular, la  $Y_g$  podría considerarse como la diferencia entre el rendimiento máximo observado, y el rendimiento obtenido en cada sitio específico dentro de la chacra. Para esta situación, los factores determinantes del rendimiento (temperatura y radiación) y el aporte hídrico (precipitaciones) son iguales, por lo que las diferencias en rendimiento se deben a diferencias en las propiedades del suelo. Éstas en general se relacionan con la ocurrencia de distintos tipos de suelo (Bakhsh et al., 2000; Terra et al., 2006; Pravia, 2009). Bajo el

mismo tipo de suelo, las diferencias se deben a la ocurrencia de procesos de degradación, o a la posición topográfica (Pierce y Nowak, 1999).

El objetivo principal de este trabajo fue identificar las propiedades físicas y/o químicas responsables de la brecha de rendimiento intra-chacra para una secuencia de cultivos.

## Materiales y Métodos

Para este trabajo se utilizó información proveniente de un experimento de descompactación sub-superficial realizado en una chacra experimental. Los tratamientos correspondieron a una comparación de siembra sin labranza (SD) contra descompactación mecánica sub superficial (D). Este sitio fue elegido debido a que la presencia de los tratamientos generó un gradiente de resistencia mecánica a la penetración (RP) del suelo que, combinado con la historia de manejo (años de agricultura) y variabilidad natural del suelo, generó variabilidad en las propiedades físicas y químicas para un ambiente inicialmente homogéneo.

La secuencia de cultivos utilizada consistió en Soja – Cebada – Maíz. El rendimiento promedio de la secuencia se calculó estandarizando el rendimiento de cada cultivo en función de sus respectivas medias:

$$Y_{is} = \frac{\sum(Y_{ij} - Y_j)}{n}$$

donde:  $Y_{is}$  es el rendimiento promedio de la secuencia en el punto  $i$ ,  $Y_{ij}$  es el rendimiento en el punto  $i$  para el cultivo  $j$ ,  $Y_j$  es el rendimiento promedio del cultivo  $j$ , y  $n$  es el número de cultivos.

En 168 puntos de muestreo se determinó: concentración de bases (Ca, Mg, K), fósforo (P), electroconductividad aparente, resistencia a la penetración (RP), pH y carbono orgánico (COS).

Con el fin de determinar una única propiedad de suelo responsable de la  $Y_g$  se consideró el enfoque de la ley del mínimo propuesta por Lie-

big (1855). Para ello se relacionó el rendimiento de toda la secuencia con cada una de las propiedades de suelo a través del análisis de curva envolvente (Shatar y McBratney, 2009). El ajuste de la curva envolvente se realizó mediante el método de regresión de cuantiles utilizando el paquete *quantreg* del software R.

Se cuantificó la Yg comparando el rendimiento ajustado según la curva envolvente contra el máximo rendimiento observado en toda la chacra y el observado en cada punto de muestreo.

## Resultados y Discusión

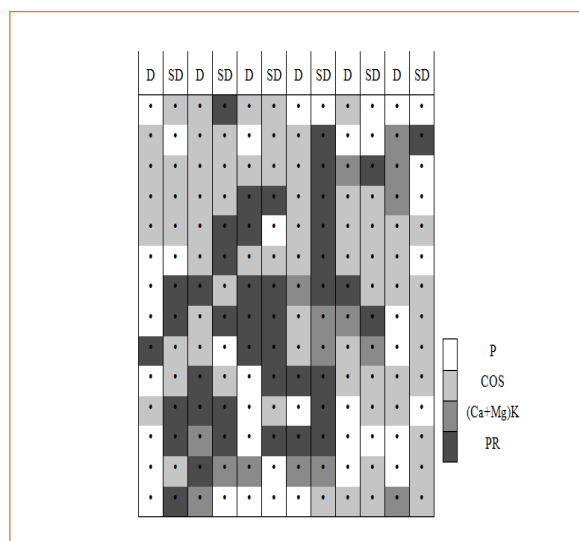
La regresión de cuantiles para el percentil 0.90 presentó ajuste significativo al relacionar el rendimiento de la secuencia con el COS, la RP, la concentración de fósforo (P) y la relación de bases medida como  $(Ca+Mg)/K$ . Una vez ajustadas estas curvas fue posible identificar el factor limitante del rendimiento de la secuencia. Para el 40% del área estudiada el COS fue identificado como el factor limitante. La RP, el P y la relación de bases  $(Ca+Mg)/K$  aparecieron en el 26%, 24% y 10% del área respectivamente (**Figura 1**). La proporción en la que aparecieron el COS y la RP (66%) como factores limitantes del rendimiento podría estar indicando la presencia de procesos de degradación física del suelo, ya que ambas

propiedades han sido relacionadas con problemas de compactación de suelo por diferentes autores (Alvarez et al., 2009; Botta et al., 2007; Hamza y Anderson, 2005; Sadras et al., 2005).

Al analizar los valores que tomaron cada una de las propiedades cuando aparecieron como limitantes, se pudieron establecer los valores críticos a partir de los cuales cada una de ellas deja de actuar como limitante. Para el caso del COS cuando este se encontró por encima de 3.4% en los primeros 10 cm de profundidad, o por encima de 2.8% entre 10 y 20 cm de profundidad, no actuó como factor limitante. Para el caso de la RP, cuando ésta se encontró por debajo de 1300 kPa no limitó el rendimiento de la secuencia. Para ambas propiedades, los valores críticos encontrados difieren de los valores establecidos por la bibliografía. Para el COS los valores manejados en la región para rendimiento de trigo, por ejemplo, son en el entorno de 1.7% y 2.0% (Díaz Zorita et al., 1999). En cuanto a la RP, en general se toma al valor de 2000 kPa como el nivel crítico a partir del cual se ve limitado el crecimiento radicular (Boone et al., 1986; Glinski y Lipiec, 1990).

Al comparar el rendimiento promedio ajustado para el cuantil superior ( $Ys_{aj}$ ) con el rendimiento promedio observado de la secuencia ( $Ys_{obs}$ ), se pudo estimar la Yg (**Figura 2**). La diferencia del  $Ys_{aj}$  con el rendimiento máximo observado representó la brecha identificada ( $Id_{Yg}$ ), lo que significa que la diferencia entre el rendimiento ajustado y el máximo es consecuencia de cada una de las propiedades identificadas como limitantes. La diferencia entre  $Ys_{aj}$  y  $Ys_{obs}$  representó la brecha de rendimiento no identificada ( $Non Id_{Yg}$ ). Esta significa que el rendimiento observado fue aún menor que el estimado para el factor limitante, probablemente producto de que otras propiedades no analizadas en este trabajo estén actuando como limitantes del rendimiento. La  $Id_{Yg}$  fue en promedio 0.162 (como rendimiento promedio de la secuencia), mientras que la  $Non Id_{Yg}$  fue en promedio 0.077. Considerando la Yg total, el 70% correspondió a  $Id_{Yg}$  y el 30% a  $Non Id_{Yg}$ .

Considerando cada una de las propiedades limitantes identificadas, se estimó la Yg producto de cada una de ellas. Cuando el COS fue la limitante, este produjo una Yg de 0.174, para la relación de bases  $((Ca+Mg)/K)$ , P y RP, la Yg fue 0.145, 0.157, y 0.155, respectivamente. Cono-



**Figura 1.** Factor limitante del rendimiento en cada punto de muestreo. D: descompactado, SD: siembra directa P: fósforo; COS: carbono orgánico del suelo; RP: resistencia a la penetración. Fuente: Etchegoimberry et al. (2019).

ciendo el rendimiento promedio de cada uno de los cultivos que conformaron la secuencia, se transformó la Yg promedio en Mg/ha de cada cultivo. Por lo tanto la Yg en promedio representó 400 kg.ha<sup>-1</sup> de soja, 780 kg.ha<sup>-1</sup> de cebada o 1300 kg.ha<sup>-1</sup> de maíz (Tabla 1). Estos valores no son acumulativos, representan la pérdida de rendimiento a través de toda la secuencia.

Conclusiones

Utilizando la estrategia propuesta fue posible identificar las propiedades de suelo responsables de la brecha de rendimiento de una secuencia de cultivos a escala de chacra.  
En la mayor proporción del área las limitantes identificadas fueron el carbono orgánico y la resistencia a la penetración.  
Las propiedades de suelo determinaron una brecha de rendimiento de 400 kg.ha<sup>-1</sup> de soja, 780 kg.ha<sup>-1</sup> de cebada o 1300 kg.ha<sup>-1</sup> de maíz para toda la secuencia.

Bibliografía

Alvarez C.R., M. Torres, E.R. Chamorro, D. D´ambrosio, y M.A. Taboada. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. Revista Ciencia del Suelo (Argentina) 27 (2): 159-169.

Bakhsh A., T.S. Colvin, D.B. Jaynes, R.S. Kanwar, y U.S. Tim. 2000. Using soil attributes and GIS for interpretation of spatial variability in yield. American Society of Agricultural Engineers 43(4): 819-828.

Botta G.F., O. Pozzolo, M. Bomben, H. Rosatto, D. Rivero, M. Ressia, M. Tourn, E. Soza, y J. Vázquez. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. Soil and Tillage Research 96: 145 -154.

Boone F.R., K.H. van der Werf, B. Kroesbergen, B.A. ten Hag, y A. Boers. 1986. The effect of

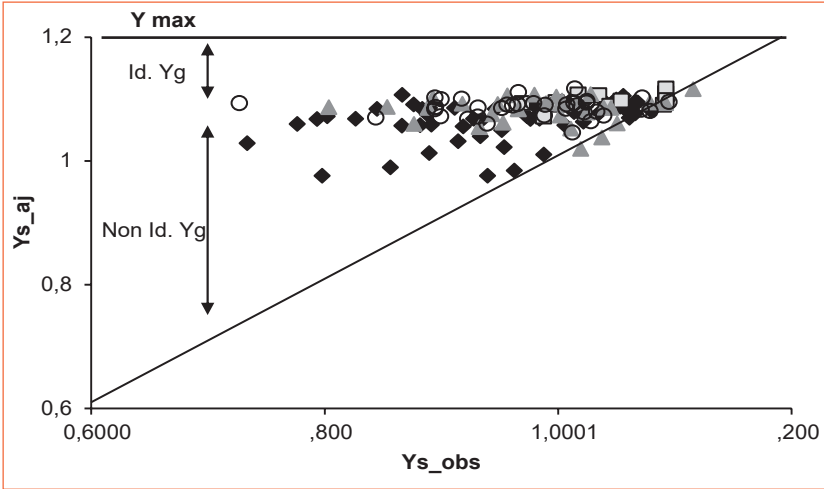


Figura 2. Rendimiento ajustado (Ys\_aj) vs observado (Ys\_obs) de toda la secuencia, según el factor limitante identificado (◆: Carbono orgánico del suelo, ■: relación de bases (Ca+Mg/K), ▲: Fósforo, ○ : Resistencia a la penetración).

Tabla 1. Brecha identificada promedio y según limitante de suelo identificada, expresada como kg de cada uno de los cultivos de la secuencia. COS: carbono orgánico de suelo. P: concentración de fósforo. RP: resistencia a la penetración. Fuente: Etchegoimberry et al. (2019).

		Brecha identificada (kg.ha <sup>-1</sup> )				
	Rend. (kg.ha <sup>-1</sup> )	Promedio	COS (%)	(Ca + Mg) / K	P (ppm)	RP (kPa)
Soja	2492	404	434	361	390	385
Cebada	4855	788	846	704	761	751
Maíz	8198	1330	1428	1189	1284	1268



compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I. Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 34: 155-171.

**Bruinsma J.** 2009. The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? *FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*.

**Díaz-Zorita M., D.E. Buschiazio, y N. Peinemann.** 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the semiarid Argentine pampas. *Agronomy Journal* 91 (2): 276-279.

**Fletcher A.L., H.E. Brown, P.R. Johnstone, J.M. de Ruiter, y R.F. Zyskowski.** 2011. Making sense of yield trade-offs in a crop sequence: a New Zealand case study. *Field Crops Research* 124: 149-156.

**Glinski J. y J. Lipiec.** 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida. 250 pp.

**Hamza M.A., y W.K. Anderson.** 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82: 121-145.

**Hochman Z., D. Prestwidge, y P. Carberry.** 2014.

Crop sequences in Australia's northern grain zone are less agronomically efficient than implied by the sum of their parts. *Agricultural Systems* 129: 124-132

**Pierce F.J. y P. Nowak.** 1999 Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1-85

**Pravia M.V.** 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio temporal en la investigación de cultivos agrícolas. [Tesis de Maestría]. Uruguay: Facultad de Agronomía, Universidad de la República. 98p.

**Shatar T.M. y A.B. Mcbratney.** 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *Journal of Agricultural Science* 142: 553-560.

**Sadras V.O., G.J. O'Leary y D.K. Rogeta.** 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research* 91: 131- 145.

**Terra J.A., J.N. Shaw, D.W. Reeves, R.L. Raper, E. van Santen, E.B. Schwab y P.L. Mask.** 2006. Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. *Soil Science Society of America Journal* 70: 98-107. ◀

**Conocer más.  
Crecer mejor.**

8 y 9 de Mayo  
Metropolitano  
Rosario  
Argentina

[www.fertilizar.org.ar](http://www.fertilizar.org.ar)

**Simposio Fertilidad 2019**  
Conocer más.  
Crecer mejor.

# Efecto de los cultivos de servicio sobre la disponibilidad de agua y nitrógeno y el rendimiento en el cultivo de maíz en Santiago del Estero

Salvador Prieto Angueira<sup>1,2</sup>, María Clara Berton<sup>3</sup>, Javier Ventura<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INTA EEA Santiago del Estero, <sup>2</sup>UNSE FAYA, <sup>3</sup>INTA EEA Quimilí, <sup>4</sup>Monte Buey Agropecuaria S.R.L.  
prieto.salvador@inta.gob.ar

## Introducción

Los cultivos de cobertura son especies que se siembran en períodos sin cultivos de renta para incrementar el aporte de restos vegetales al suelo y de esta manera protegerlo de la erosión y a su vez mejorarlo al mantener el contenido de materia orgánica y retornar nutrientes al suelo (Fageria et al., 2005). Recientemente, debido a que estos cultivos no solo se pueden realizar con los objetivos mencionados, sino también con múltiples funciones o servicios ecosistémicos como aportar nitrógeno (N) al suelo a través de la fijación biológica de las leguminosas, incrementar la competencia contra las malezas y, por lo tanto, disminuir el uso de herbicidas, reducir la compactación del suelo, entre otros, Piñeiro et al. (2014) propuso llamarlos cultivos de servicio (CS).

Si bien los beneficios producidos por los CS son muchos, existen dos aspectos claves que deben ser tenidos en cuenta al momento de su uso ya que en determinadas situaciones pueden disminuir en el cultivo posterior la disponibilidad de agua y nutrientes, particularmente el N cuando se trata de gramíneas (Muñoz et al., 2014; Carfagno et al., 2013; Fernández et al., 2012 Restovich et al. 2012). Si bien existen importantes antecedentes sobre estos aspectos en la Pampa Húmeda (Álvarez et al., 2017; Pinto et al., 2017; Restovich et al., 2012), son escasos los trabajos publicados en los sistemas de producción agrícola de secano de Santiago del Estero, ubicados casi en la totalidad en la región fitogeográfica Chaqueña, entre las unidades Chaco Semiárido y Sub-húmedo (Oyarzabal et al., 2018), y en donde los principales factores limitantes de la producción son el agua y la disponibilidad de N.

El éxito en el corto plazo de la adopción de los CS se basa en que los mismos no afecten el rendimiento de los cultivos posteriores de renta. Si esto se logra, los CS brindarán la oportunidad de intensificar los sistemas de producción buscando mitigar problemas ambientales asociados con

el monocultivo y la agricultura simple o no diversificada (Pinto et al., 2017). Por lo tanto, y dado que muchos aspectos sobre la realización de CS previos al maíz en los sistemas de producción de Santiago del Estero y norte argentino se desconocen, el objetivo de este trabajo es el de evaluar como los CS modifican el contenido de agua y nitrógeno del suelo al momento de la siembra del maíz y como estos cambios se relacionan con el rendimiento del cultivo.

## Materiales y métodos

### *Sitio experimental, tratamientos, diseño experimental y manejo del cultivo*

Se realizaron 5 experimentos (**Exp**) durante tres campañas (2015, 2016 y 2017) en el establecimiento María Teresa ubicado en la localidad de Quimilí, provincia de Santiago del Estero (27°36'51.85"S, 62°43'22.62"O), perteneciente a la región fitogeográfica Chaqueña, área Chaco Semiárido (Oyarzabal et al., 2018). En el 2015 se realizó un **Exp** donde se evaluaron 6 CS y en el 2016 y 2017 dos **Exp** cada año donde se evaluó en cada año 7 y 1 CS (**Tabla 1**). Cada **Exp** tuvo como tratamiento control un barbecho químico (**Bq**) que se mantuvo libre de malezas. El suelo donde se realizaron los **Exp** correspondieron a un Haplustol éntico, profundo, bien drenado y de textura franco limosa (Prieto Angueira et al., 2018).

Los **Exp** se sembraron luego de la cosecha de soja, y salvo en el **Exp** 4, la siembra se realizó la primera semana de mayo, con una distancia entre surcos de 0.26 y 0.52 m para las gramíneas y leguminosas, respectivamente (**Tabla 1**). Las unidades experimentales (**UE**) tuvieron una superficie de 333 m<sup>2</sup> (16.6 m de ancho y 20 de largo). El secado de las gramíneas se realizó entre floración (Z6, Tottman et al., 1979) y madurez acuosa (Z7, Tottman et al., 1979), mientras que las leguminosas se secaron a comienzo de floración (**Tabla 1**). El secado se realizó químicamente con

glifosato en una dosis de 4000 cc ha<sup>-1</sup> en el caso de las gramíneas y glifosato en la misma dosis y 500 cc ha<sup>-1</sup> de dicamba en las leguminosas. El diseño utilizado en cada experimento fue completamente aleatorizado con 3 (Exp 1-3) o 4 repeticiones (Exp 4 y 5, **Tabla 1**).

### Mediciones y cálculos

En la siembra del cultivo de maíz se determinó el contenido de agua útil con el método gravimétrico para lo cual en cada UE se extrajeron 10 muestras en intervalos de 0.2 m. Las muestras se pusieron a estufa a 105°C hasta peso constante y calculó el agua útil de cada intervalo como el producto del contenido gravimétrico de agua, la densidad aparente y el espesor del intervalo; y posterior resta del contenido de agua en el punto

de marchitez permanente. Previamente se determinó la densidad aparente (Blake y Hartge, 1986) extrayendo 3 muestras por horizonte de suelo con cilindros de 250 cm<sup>3</sup> y el punto de marchitez permanente (PMP, 1500 KPa) mediante la extracción por placas de presión en muestras disturbadas y tamizadas según la metodología propuesta por Richards (1948). El contenido de agua útil se expresó como la sumatoria del agua útil de los 10 intervalos muestreados (AU) y como costo hídrico (CH) calculado como la diferencia del AU promedio del Bq y el de cada tratamiento con CS.

Se determinó además en la siembra del maíz el contenido de nitrógeno (N) del suelo a partir de la determinación del contenido de N como nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) determinados por el método colorimétrico del ácido fenoldisulfónico. Se extrajeron muestras compuestas (3 submuestras)

**Tabla 1.** Experimento (Exp), cultivos de servicio (CS) y ciclo, fecha de siembra y secado químico de CS, fecha de siembra de maíz y precipitaciones acumuladas durante el período siembra de CS a siembra de maíz y durante ciclo del maíz.

Exp	CS y ciclo	Fecha siembra CS	Fecha de secado químico	Fecha siembra maíz	Precipitaciones acum. (mm)	
					Siembra CS a siembra maíz	Ciclo del maíz
1	Avena sativa	01/05/2015	18/08/2015	03/01/2016	342	216
	Cebada		18/08/2015			
	Centeno largo		27/08/2015			
	Trigo intermedio		09/09/2015			
	Trigo largo		14/09/2015			
	Triticale largo		22/09/2015			
2	Trigo corto	11/05/2016	26/08/2016	03/01/2017	375	378
	Centeno corto		26/08/2016			
	Trigo largo		24/09/2016			
	Triticale largo		24/09/2016			
	Centeno largo		06/09/2016			
	Vicia villosa		31/10/2016			
	Melilotus blanco		31/10/2016			
3	Trigo corto	10/05/2017	01/09/2017	07/01/2018	242	360
	Centeno corto		01/09/2017			
	Trigo largo		03/10/2017			
	Triticale largo		22/09/2017			
	Centeno largo		22/09/2017			
	Vicia villosa		22/09/2017			
	Melilotus blanco		25/10/2017			
4	Vicia villosa	11/03/2016	05/09/2016	05/01/2017	450	378
5	Vicia villosa	07/05/2017	15/09/2017	08/01/2018	242	360

en 3 intervalos de 0.2 m cada uno. Las muestras se secaron en estufa a 40°C durante 48 horas y luego se hizo la determinación de  $N-NO_3^-$  en laboratorio. El contenido de N se expresó como la sumatoria de  $N-NO_3^-$  de los 3 intervalos, luego de multiplicar por el valor de la densidad aparente de cada intervalo y como costo de nitrógeno (CN), calculado como la diferencia del N promedio del Bq y el de cada tratamiento con CS.

En madurez fisiológica del maíz se determinó el rendimiento en cada UE a partir de la cosecha y trilla de 10 m<sup>2</sup> (2 surcos distanciados a 0.52 m y 9.62 m de largo). Los granos se colocaron en estufa a 60°C hasta peso constante para la determinación del rendimiento. En cada experimento el rendimiento se expresó en forma relativa al rendimiento (Rto relativo) del Bq.

### Análisis estadístico

Se utilizaron modelos de regresión lineal para evaluar la relación entre el CH y CN y entre el Rto relativo y el AU, contenido de N y ambos en simultáneos utilizando InfoStat (Di Rienzo et al., 2014). Se hizo un análisis multivariado de componentes principales (ACP) de la combinación de Exp y CS y con las variables vector AU, CH, N, CN en la siembra de maíz y Rto relativo utilizando InfoStat (Di Rienzo et al., 2014).

## Resultados y Discusión

La realización de diferentes CS provocó, en aproximadamente 80% de los casos, disminución en el AU al momento de la siembra del maíz en relación al Bq y por lo tanto CH (Figura 1). El CH promedio en las gramíneas fue de 27.1 mm, lo que implicó una reducción del AU del 11.1% respecto al Bq, mientras que como consecuencia de una mayor duración del ciclo (Tabla 1), fue casi 3 veces superior en las leguminosas (75.5 mm de CH y una reducción del 31.6% respecto del Bq (Figura 1).

Cuando se realizan CS previo al maíz, el AU al momento de la siembra del cultivo estival es el resultado de la combinación del AU en la siembra de los CS, el consumo de agua de estos y las precipitaciones ocurridas tanto durante el ciclo de los CS como luego del secado. Las precipitaciones promedio para el período mayo-diciembre de la serie histórica Quimilí (serie 1918-2001) son de 321 mm y para el período marzo-diciembre de 475 mm, por lo que salvo en los Exp 3 y 5, las precipitaciones ocurridas estuvieron por encima de la media (Tabla 1). Por lo tanto, los motivos por los cuales la realización de CS provocó un CH se debería a que el consumo de los CS superó a la evaporación del Bq, tal como lo demuestran los resultados publicados por Prieto Angueira et al. (2018), y las precipitaciones luego del secado no

fueron suficientes para lograr la recuperación del perfil. Estos resultados coinciden por los reportados por Carfagno et al. (2013) y Fernández et al. (2012) quienes en otras zonas Semiáridas como las de Quimilí, reportaron disminuciones en el contenido de humedad del suelo como consecuencia de la realización de cultivos de cobertura invernales.

En cuanto al N, la realización de CS provocó en todos los casos, inclusive en las leguminosas, disminuciones en la disponibilidad del nutriente en relación al Bq al momento de la siembra del maíz (Figura 1). Como era de esperar el CN promedio fue superior en las gramíneas, siendo el

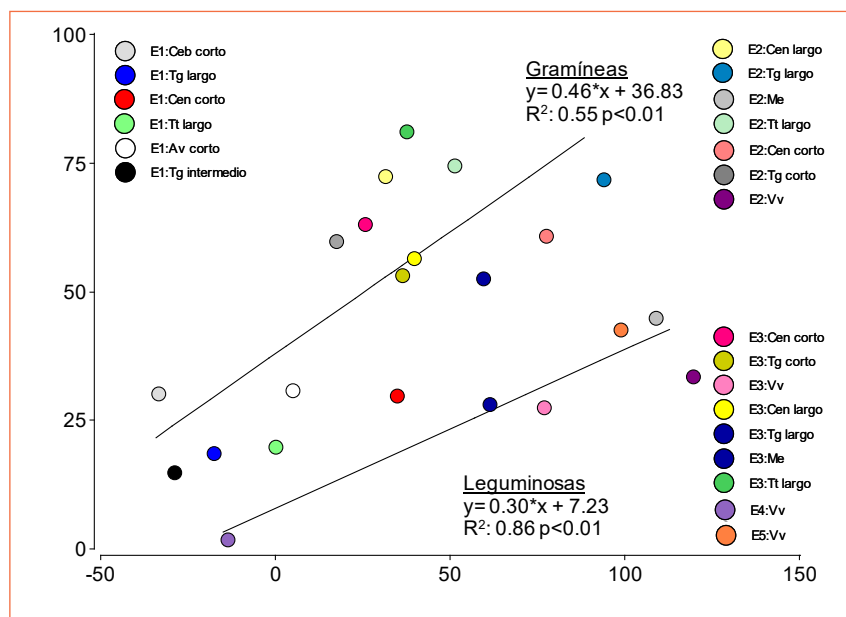


Figura 1. Relación entre el costo de nitrógeno (N) y costo hídrico por la realización de cultivo de servicio gramíneas o leguminosas (Av, avena; Ceb, cabada; Cen, centeno; Tg, trigo; Me, melilotus blanco; Vv, vicia villosa).



mismo de  $49.2 \text{ kg N ha}^{-1}$ , lo que equivale a una reducción del 34% respecto al Bq (Figura 1). En el caso de las leguminosas, el CN promedio fue de  $29.6 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$  siendo aproximadamente un 40% inferior al de las gramíneas. Estos resultados coinciden parcialmente con los reportados por Álvarez et al. (2018) quienes a través de una revisión sistemática demostraron para la región Pampeana disminuciones en los contenidos de N luego de la realización de cultivos de cobertura, pero siendo las disminuciones de similar magnitud tanto en no-leguminosas como leguminosas.

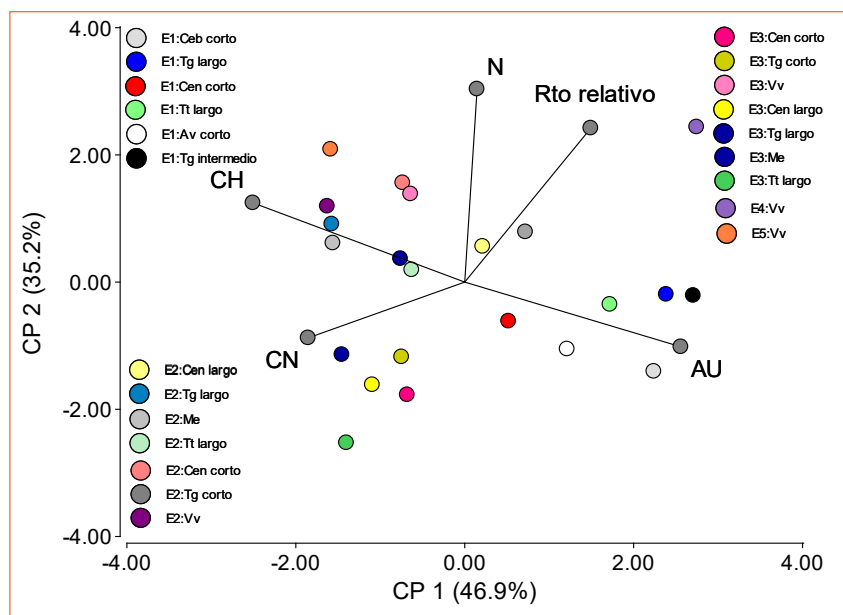
Es importante destacar que el CN encontrado en este trabajo, no implica que las leguminosas no hayan fijado N atmosférico. Esto se comprueba al analizar la relación entre el CN y el CH, las cuales si bien fueron positivas y significativas ( $p < 0.01$ ) tanto en las gramíneas como leguminosas, indicando aumento del CN con el aumento del CH, la pendiente fue menor en las leguminosas. Por lo tanto, a un mismo nivel de CH, el CN fue menor en las leguminosas, situación que podría ser explicada por una efectiva fijación del N atmosférico. Sin embargo estas diferencias podrían también estar asociadas con las distintas

relaciones C:N entre ambas familias botánicas (Frasier et al., 2017).

Finalmente, el CN encontrado en las leguminosas quizás está asociado a: i) que la duración del ciclo, fijación de N y producción de biomasa de las leguminosas no fue suficiente; ii) el tiempo disponible desde el secado a la siembra del maíz fue corto lo que no permitió su liberación; y/o iii) la profundidad de muestreo de suelo para la caracterización de la variable fue insuficiente (Salvagioti et al., 2008; Fageria et al., 2005). Así, por ejemplo, el CS *Vicia villosa* del Exp 4 fue la leguminosa de mayor duración de ciclo y producción de biomasa y la de mayor número de días desde el secado a la siembra del maíz y por lo tanto menor CN (Figura 1). Nuevos estudios deberán ser llevados a cabo para resolver estos interrogantes.

Para un análisis más completo e integral del comportamiento de los CS y su efecto sobre la disponibilidad de agua y N y consecuente rendimiento de maíz, se realizó un ACP. El porcentaje de la variación total explicada por las dos primeras dimensiones del ACP fue del

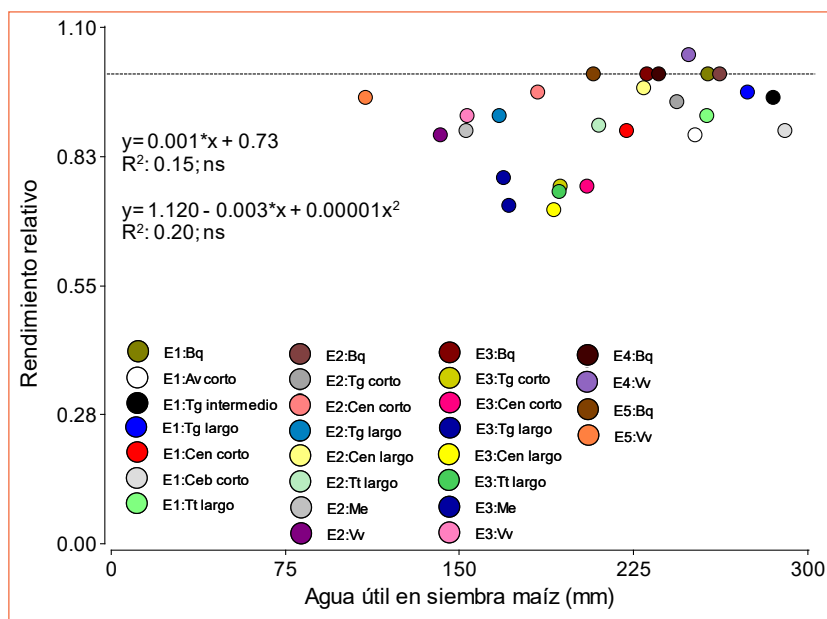
82 % (Figura 2). Los casos se ubicaron de acuerdo a un gradiente hídrico sobre CP1, ubicándose los CS con mayor AU a la derecha, y en dirección opuesta los de mayor CH (Figura 2). Por el contrario, sobre el CP2 se generó un gradiente de N, donde el contenido de N en la siembra de maíz y CN presentaron proyecciones positiva y negativa, respectivamente. El CN se proyectó sobre CP1 en la misma dirección que CH, y tal como lo observado en la Figura 1, existió una correlación positiva entre ambas variables (Figura 2).



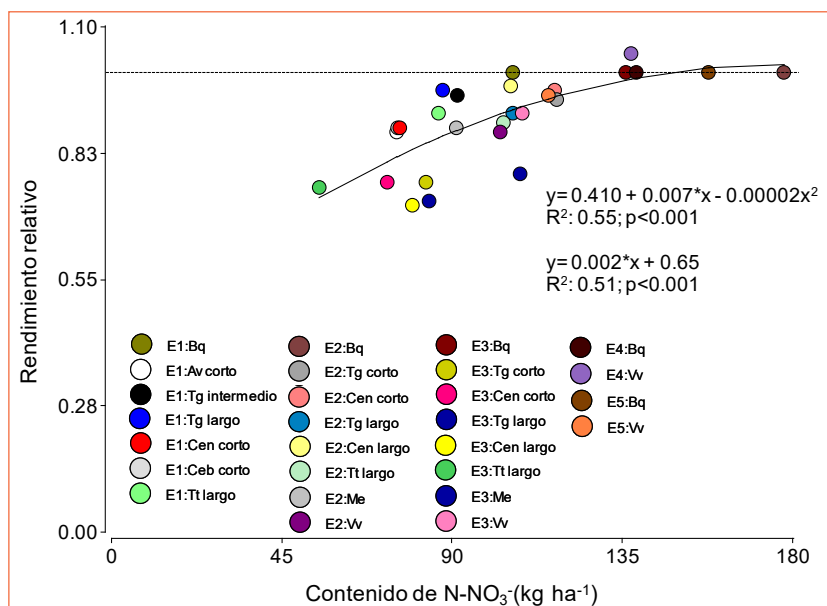
**Figura 2.** Biplot obtenido mediante análisis de componentes principales (ACP) sobre las variables costo hídrico (CH) y de nitrógeno (CN), agua útil acumulada y nitrógeno disponible a la siembra del maíz (AU y N, respectivamente) y rendimiento del maíz relativo al barbecho químico (Rto relativo), para 22 combinaciones de experimentos (E) y especies-ciclo de cultivo de servicio (CS). Los CS (Av, avena; Ceb, cabada; Cen, centeno; Tg, trigo; Me, melilotus blanco; Vv, vicia villosa) están representados por los puntos y las variables por los vectores desde el origen.

Las diferencias de comportamiento de los CS estuvieron más asociadas a los Exp que las especies y su ciclo. Así el AU y CH fueron mayor y menor, respectivamente en los casos del Exp

1 (todas gramíneas) y 4 (*Vicia villosa*); intermedio en 4 de las 5 gramíneas del Exp 2 y opuesto y asociadas al CH en las leguminosas del Exp 2 y *Vicia villosa* del Exp 5.



**Figura 3.** Relación entre el rendimiento de maíz relativo al barbecho químico (Bq) y agua útil en la siembra del maíz en distintos experimentos y cultivos de servicio (Av, avena; Ceb, cabada; Cen, centeno; Tg, trigo; Me, melilotus blanco; Vv, vicia villosa).



**Figura 4.** Relación entre el rendimiento de maíz relativo al barbecho químico (Bq) y contenido de nitrógeno como nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ; acumulado de 0-60 cm) en la siembra del maíz en distintos experimentos y cultivos antecesores (Av, avena; Ceb, cabada; Cen, centeno; Tg, trigo; Me, melilotus blanco; Vv, vicia villosa).

Si bien se detectaron importantes diferencias entre CS en AU en la siembra de maíz (Figuras 1 y 2) y las precipitaciones durante el ciclo del maíz fueron inferiores a las necesidades hídricas que son de 450 mm para la región, el **Rto relativo** presentó baja o nula correlación con las variables que expresan el contenido hídrico a la siembra (AU y CH). La falta de asociación entre el **Rto relativo** y el AU se comprueba en la Figura 3 ya que no se encontró relación significativa entre ambas variables.

Es importante destacar que, salvo en *Vicia villosa* del Exp 4, el **Rto relativo** al Bq fue en la mayoría de los casos inferior a 1, indicando un efecto adverso de los CS sobre el rendimiento del maíz. Esta caída relativa en los CS, como se observa en la Figura 2, está asociada a los cambios en N y el CN ya que ambas variables correlacionaron positiva y negativamente con el **Rto relativo**, respectivamente.

Consecuentemente, se encontró una relación significativa ( $p < 0.001$ ) entre el **Rto relativo** y N, disminuyendo el rendimiento cuando la disponibilidad del nutriente fue inferior a  $136 \text{ kg N-NO}_3^- \text{ ha}^{-1}$  (Figura 4). Hasta donde se sabe, esta es la primera relación publicada para el norte argentino del efecto de los CS sobre N y su relación con el rendimiento.

Finalmente es importante destacar que al evaluar como las variables **AU** y **N** explican en simultáneo los cambios en el **Rto relativo**, la relación es positiva y significativa ( $p < 0.05$ ) pero con un nivel de ajuste superior a la relación individual de cada variable con el **Rto relativo**.

## Conclusiones

La realización de CS en Santiago del Estero disminuyó el AU y N en la siembra del maíz y por lo tanto generó, en relación al Bq, costos en términos de agua y nitrógeno. Contrariamente a lo esperado, las diferencias en el Rto relativo no estuvieron asociadas al AU sino a la disponibilidad de N ya que se encontró una relación significativa entre N a la siembra y el rendimiento del cultivo de maíz.

## Bibliografía

- Alvarez, R., Steinbach, H.S., De Paepe, J.L. 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 170, 53-65.
- Blake, GR y KH Hartge. 1986. Bulk density. En: A Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis - Physical and Mineralogical Methods*. 2da edn. Pp 363-375-Am. Soc. Agron. Madison. Estados Unidos. 634.
- Carfagno, P.F., Eiza, M.J., Quiroga, A., Babinec, F., Chagas, C., Michelena, R. 2013. Water availability in soybean monoculture, with cover crops and reduced fallow in the subhumid and semiarid Pampean region. *Ciencia del Suelo* 31, 67-81.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., Bailey, B.A. 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36, 2733-2757.
- Fernández, R., Quiroga, A., Noellemeyer, E. 2012. Cover crops: A viable alternative for the semiarid Pampa region? *Ciencia del Suelo* 30, 137-150.
- Frasier, I., Noellemeyer, E., Amioti, N., Quiroga, A. 2017. Vetch-rye biculture is a sustainable alternative for enhanced nitrogen availability and low leaching losses in a no-till cover crop system. *Field Crops Res.* 214, 104-112.
- Muñoz, J.D., Steibel, J.P., Snapp, S., Kravchenko, A.N. 2014. Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 189, 229-239.
- Oyarzabal M, Clavijo J, Oakley L, Biganzoli F, Tognetti P, Barberis I, Maturro H, Aragón R, Campanello P, Prado D, Oesterheld M, León R. 2018. Unidades de Vegetación de la Argentina. *Ecología Austral* 28: 40-63
- Pinto, P., Fernández Long, M.E., Piñeiro, G. 2017. Including cover crops during fallow periods for increasing ecosystem services: Is it possible in croplands of Southern South America? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 248, 48-57.
- Piñeiro, G., Pinto, P., Arana, S., Sawchik, J., Díaz, J.I., Gutiérrez, F., Zarza, R. 2014. Cultivos de servicio: integrando la ecología con la producción agrícola. En: XXVI Reunión Argentina de Ecología. Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.
- Prieto Angueira, S., M. C. Berton, J. Ventura. 2018. Cultivos de cobertura en Santiago del Estero: II. Dinámica en el contenido de agua del suelo y costo hídrico. En *Actas XXVI Congreso Argentino de Ciencia de Suelo*. Pp 1275-1280. San Miguel de Tucumán, Argentina. ISBN 978-987-46870-0-5.
- Restovich, S.B., Andriulo, A.E., Portela, S.I. 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Res.* 128, 62-70.
- Richards, LA. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110.
- Rosecrance, R.C., McCarty, G.W., Shelton, D.R., Teasdale, J.R. 2000. Denitrification and N mineralization from hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) and rye (*Secale cereale* L.) cover crop monocultures and bicultures. *Plant and Soil* 227, 283-290.
- Silva, F.A.M., Naudin, K., Corbeels, M., Scopel, E., Affholder, F. 2019. Impact of conservation agriculture on the agronomic and environmental performances of maize cropping under contrasting climatic conditions of the Brazilian Cerrado. *Field Crops Res.* 230, 72-83.
- Tottman, DR; RJ Makepeace & H Broad. 1979. An explanation of the decimal code for the growth of cereals, with illustration. *Ann. Appl Biol.* 93: 221-34. ◀

# Intensificación agrícola: el balance productividad-conservación de propiedades del suelo dependen de la rotación

Oswaldo Ernst<sup>1</sup>, Armén Kemanian<sup>2</sup>, Sebastián Mazzilli<sup>1</sup>, Mónica Cadenazzi<sup>3</sup>, Guillermo Siri-Prieto<sup>1</sup> y Santiago Dogliotti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de la Púbrica Oriental del Uruguay. Facultad de Agronomía. Departamento de Producción Vegetal

<sup>2</sup> Department of Plant Science, The Pennsylvania State University

<sup>3</sup> Universidad de la Púbrica Oriental del Uruguay. Facultad de Agronomía. Departamento de Biometría, Estadística y Computación  
oernst@fagro.edu.uy

## Introducción

El cambio en el uso y manejo del suelo ocurrido en los últimos 20 años en el Este de las Pampas de América del Sur es un ejemplo de intensificación agrícola. El mismo implicó sustituir un sistema de rotación compuesto de tres o cuatro años de cultivos anuales seguidos por tres o cuatro años con pasturas plurianuales compuestas por gramíneas y leguminosas perennes, por sistemas agrícolas sin labranza (Franzluebbers et al., 2014, Wingeyer et al., 2015). Considerando Uruguay, Argentina, Bolivia, Paraguay, y los estados del sur de Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, y Paraná), la superficie agrícola se incrementó en 6,2 millones de ha, en un sistema dominado por soja, pero que incluye maíz y trigo en rotación como cultivos principales (63%, 19% y 21% de la superficie, respectivamente) (FAOSTAT, 2016).

En Uruguay, la superficie ocupada por cultivos anuales incrementó exponencialmente desde menos de 350.000 ha en el año 2002 a más de 1.500.000 ha en el 2011. El 70% del crecimiento ocurrió en la zona agrícola tradicional (Departamentos de Colonia, Soriano, Río Negro y Paysandú), a expensas del tiempo de la rotación ocupado por pasturas, por lo que el sistema se transformó desde agricultura rotando con pasturas a agricultura continua sin laboreo. El 30% restante del crecimiento ocurrió como resultado de un proceso de expansión hacia nuevas zonas (DIEA, 2011).

El cambio se considera un proceso de intensificación agrícola en la medida de que se duplicó la producción acumulada de grano por unidad de superficie del sistema (Ernst y Siri-Prieto, 2011). No obstante, aún bajo un escenario de crecimiento del rendimiento por unidad de

insumo aplicado, no implica que el proceso sea sostenible, ya que puede ocurrir a expensas de degradación y polución de los recursos naturales involucrados (Garnett y Godfray, 2012).

El mismo se sostuvo en dos paradigmas de la agricultura moderna: comparados con la agricultura realizada bajo labranza, i) los sistemas agrícolas bajo no labranza tienen efectos positivos sobre la calidad del suelo (Álvarez y Steinbach, 2009; Fuentes et al. 2009), y ii) la performance del sistema mejora si el diseño de la secuencia incluye rotar cultivos (Porter et al., 2003; Munkholm et al, 2013).

No obstante, varios autores cuestionan la sostenibilidad de este proceso. La información local y regional muestra las ventajas de la rotación pasturas-cultivos cuando se evalúa su impacto sobre las propiedades físico-químicas del suelo, el uso de agroquímicos, la estabilidad económica y productiva, y la emisión de gases causantes del efecto invernadero (Díaz Roselló 1992, Studdert et al., 1997, Díaz-Zorita et al., 2002, García-Préchac et al., 2004, Perdomo et al., 2009, Ernst y Siri-Prieto 2009, Salvo et al., 2010).

Comparado con el sistema tradicional de manejo del suelo con labranza intensiva, la siembra sin laboreo representa un cambio positivo, particularmente en ambientes con alto riesgo de erosión (García-Préchac et al., 2004). No obstante, un análisis detallado de experimentos y relevamientos de sistemas productivos comerciales de la región demuestran que los impactos positivos sobre la cantidad de carbono orgánico del suelo dependen de la condición inicial del suelo y productividad del sistema (Álvarez y Lavado, 1998, Morón et al., 2012, Conceição et al., 2013, Mazzilli et al., 2014, 2015). En suelos con alto contenido inicial de carbono el balance



puede ser negativo (25% de los casos analizados por Álvarez, 2005) y el rendimiento de los cultivos anuales sólo resulta consistentemente igual o mayor que el obtenido con labranza en condiciones de baja disponibilidad hídrica y ajustada fertilización nitrogenada (Álvarez y Steinbach 2009, Pittelkow et al., 2015). Adicionalmente, luego de más de 20 años de siembra sin laboreo de manera continua, comenzaron a manifestarse problemas atribuidos a la compactación del suelo, cuantificados como cambios en la estructura de los agregados del suelo y su consiguiente efecto sobre las propiedades hídricas del suelo, específicamente la velocidad de infiltración del agua y conductividad hídrica del suelo (Aparicio y Costa 2007, Sasal et al., 2006, Álvarez et al., 2014, Sasal et al., 2017).

Este escenario representa un cuestionamiento a la sostenibilidad del cambio implementado, sobre el cual existe escasa información que permita valorarlo en términos de productividad actual y, en especial, sobre sus impactos en la "productividad futura", ambas definidas como requisito para la calificación de "intensificación sostenible".

Intensificación sostenible es un concepto guía utilizado para diseñar un nuevo proceso de intensificación de la agricultura. Implica aumentar la producción de alimentos de la superficie actual bajo agricultura, implementando tecnologías que tengan un menor impacto ambiental y que no menoscaben nuestra capacidad de continuar produciendo alimentos en el futuro (Garnett et al., 2013). Está asociado al concepto de eco-eficiencia, o producir más con menos impacto. A diferencia de la intensificación ecológica, que incluye la complejidad que supone la consideración de una escala a nivel de paisaje, las decisiones son diseñadas a escala de unidad productiva (Tittonell, 2014). La implementación de ambos conceptos supone identificar y reducir las ineficiencias de uso de los recursos, de manera de reducir las consecuencias negativas de la agricultura sobre el ambiente tanto en el sitio, como fuera del sitio en el que se toman las decisiones.

En este trabajo se resumen resultados obtenidos en un proyecto planteado bajo la hipótesis de que la trayectoria de intensificación agrícola implementada en el pasado reciente en Uruguay y la región está generando un proceso sutil pero acumulativo de degradación del suelo, que reduce también de manera sutil y acumulativa,

el rendimiento alcanzable por los cultivos. El efecto resulta de una reducción en la capacidad de suministro de nutrientes y/o de agua para sostener el crecimiento de las plantas y, como consecuencia, se reduce la eficiencia con que se utilizan. Si esta degradación es real, la intensificación sostenible debería revertir, no acentuar, la degradación de suelo y el ambiente en general.

Los objetivos fueron:

- i) Diagnóstico del efecto de los años de agricultura continua sin labranza a partir de la última pastura perenne en la rotación sobre el rendimiento alcanzable de trigo en sistemas de producción comerciales.
- ii) Evaluar si las pérdidas de rendimiento atribuibles al cambio del sistema de cultivo pueden ser reducidas incrementando la fertilización.
- iii) Investigar qué propiedades del suelo, modificadas por el cambio en el sistema de cultivo, podrían explicar las pérdidas de rendimiento.

Para el segundo y tercer objetivo la estrategia implicó: a) experimentación en campos de productores de trigo en el que se evaluó el efecto de la disponibilidad de nutrientes en un gradiente de 1 a 10 años de agricultura continua sin labranza a partir de pasturas perennes; b) evaluar el efecto del sistema de labranza (convencional contra no laboreo) combinado con rotación o no con pasturas en tres niveles de fertilización nitrogenada sobre propiedades del suelo y el rendimiento de trigo. Para ello se utilizó un experimento de largo plazo instalado en 1993 en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía, Uruguay.

## Materiales y Métodos

Para el primer objetivo se trabajó en el análisis de 1072 registros de unidades de producción (UP) de trigo suministrados por productores pertenecientes a la Federación Uruguaya de Centros Regionales de Experimentación Agropecuaria (FUCREA) de los años 2005 al 2009 incluidos, distribuidas geográficamente en las tres regiones agroclimáticas definidas para trigo en Uruguay (Corsi, 1982). Los registros incluyen variables de manejo, clima y rendimiento. Estudiamos el impacto de los años de agricultura continua sin labranza (AAC) realizados desde la última pastura perenne sembrada en la rotación sobre el ren-

dimiento alcanzable de trigo ( $Y_{alc}$ ). Definimos  $Y_{alc}$  como percentil 90 del rendimiento de trigo obtenido sobre cada combinación de año, ACC, y zona (Lobell et al., 2009). Para contemplar el efecto que las condiciones climáticas tienen sobre el rendimiento, calculamos para cada UP, un índice climatológico (CI) que combina temperatura, radiación y precipitaciones durante el período crítico de determinación del número de granos por unidad de superficie (Fischer, 1985) y durante el llenado de granos (Abatte et al., 1995). Para estimar el  $Y_{alc}$  calculamos la frontera de producción de trigo en función de las variables de clima, cultivar, fecha de siembra, y AAC, incluyendo las ineficiencias de producción definidas por el manejo del cultivo (fertilización, cultivo antecesor).

Para el segundo y tercer objetivo la estrategia implicó:

a) Experimentación en campos de productores de trigo durante tres estaciones de crecimiento, evaluando el efecto de la disponibilidad de nutrientes en un gradiente de 1 a 10 años de agricultura continua sin labranza a partir de pasturas perennes. El indicador de intensificación utilizado para elegir los sitios experimentales (80) fueron los ACC. En cada chacra se evaluó el efecto de dos niveles de nutrientes: (1) actual: fertilizando siguiendo recomendaciones actuales para N, P y K; (2) nutriente no limitante, en el cual se fertilizó con N, P, K y S de manera incremental, definiendo así un ambiente en el que el rendimiento no estuvo limitado por nutrientes. En cada sitio se determinó textura, concentración de carbono orgánico del suelo (COS), disponibilidad de fósforo (Bray I), tasa de infiltración de agua (INF) y potencial de mineralización de nitrógeno (PMN). Se estimó la frontera de rendimiento de trigo bajo "fertilización actual" y bajo "nutrientes no limitantes", incluyendo como variables AAC, el CI y las propiedades del suelo de cada sitio. como.

b) Evaluar el efecto residual del sistema de labranza (convencional contra no laboreo) combinado con rotación o no con pasturas en tres niveles de fertilización nitrogenada (0, 80 y 190 kg de N ha<sup>-1</sup>) sobre propiedades del suelo y el rendimiento de trigo sembrado sin labranza. Para ello se utilizó un experimento de largo plazo instalado en 1993 en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facul-

tad de Agronomía, Uruguay. El mismo incluye 6 tratamientos:

- i) Rotación cultivos\_pastura con laboreo convencional (ROT\_LC); ii) Rotación cultivos\_pastura sin laboreo (ROT\_SD); iii) Cultivos anuales continuo sin laboreo con alta frecuencia de sorgo y maíz (AC\_SD<sub>C4</sub>); iv) Cultivos anuales continuo sin laboreo con alta frecuencia de soja y girasol (AC\_SD<sub>C3</sub>); v) Cultivos anuales continuo sin laboreo con alta frecuencia de barbecho invernal (AC\_SD<sub>bcho</sub>); vi) Cultivos anuales continuo con laboreo convencional (AC\_LC).

La calidad del suelo fue relevada en base a su concentración de carbono orgánico (SOC) y nitrógeno total (TSN), tasa de infiltración de agua (INF), tamaño medio ponderado de agregados del suelo estables al agua (MWD) y potencial de mineralización de nitrógeno (PMN).

Estimamos la brecha de rendimiento de trigo atribuible a nitrógeno ( $Y_g^N$ ) como la diferencia entre el rendimiento obtenido con N190 y con N0 en cada tratamiento. La brecha generada en atribuible a otras propiedades del suelo ( $Y_g^{otros}$ ) no directamente asociadas a suministro de N, se estimó como la diferencia entre el rendimiento máximo cuantificado en el mejor tratamiento del experimento, ( $Y_{max}$ ) y el rendimiento con N190 de cada tratamiento. La brecha total de rendimiento corresponde a la suma de ambos componentes ( $Y_g^T = Y_g^N + Y_g^{otros}$ ).

A partir del año 2012 todo el experimento pasó a manejarse sin labranza. Los resultados corresponden a las zafras 2013 y 2014.

## Resultados y Discusión

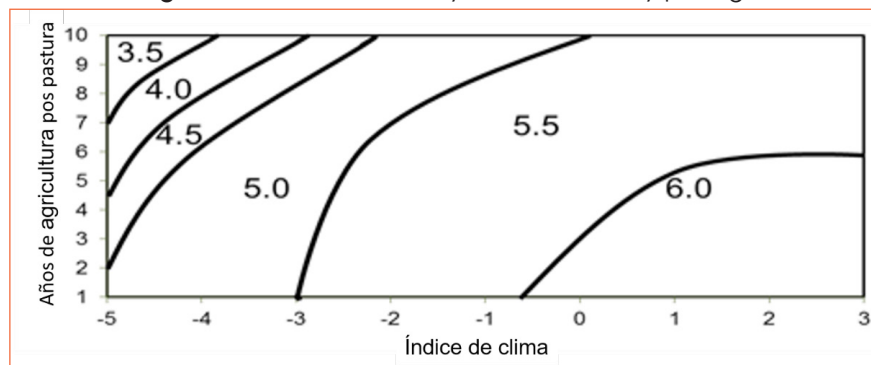
El proceso de intensificación implementado a nivel comercial generó una reducción cuantificable en el  $Y_{alc}$  de trigo, cuya magnitud dependió de las condiciones climáticas en torno a la floración y durante el llenado de granos (Figura 1).

Esta interacción representa un incremento del riesgo de producción frente a la variabilidad climática. El efecto negativo de AAC sobre el  $Y_{alc}$  de trigo se acentuó en condiciones climáticas equivalentes a primaveras con precipitaciones y temperaturas superiores a la media en torno al período crítico de definición del rendimiento y durante el llenado de grano, desapareciendo bajo condiciones ambientales favorables. Cuando el cultivo se sembró en UP con 5 o menos AAC, el  $Y_{alc}$  promedio fue de 6,0 Mg ha<sup>-1</sup>. En estos casos,

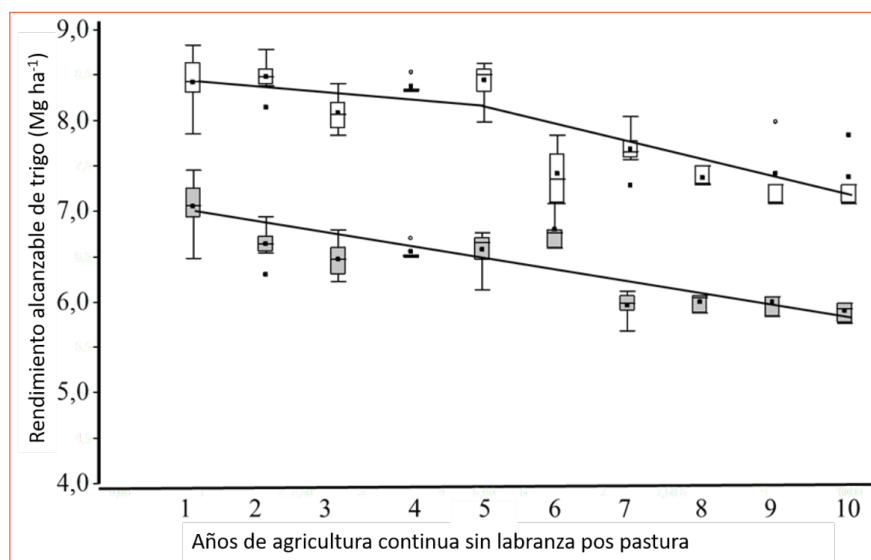
se mantuvo alto de manera independiente de las condiciones climáticas. En tanto, alargando la fase agrícola a más 5 años, el Yalc se mantuvo entre 5,5 y 6,0 Mg ha<sup>-1</sup> **sólo bajo condiciones de ambiente favorables para el cultivo, siendo menor a 4 Mg ha<sup>-1</sup> en UP con AAC > 5 y ambiente**

climático desfavorable.

Los resultados de los experimentos realizados en chacras de productores de trigo sobre suelos similares, seleccionadas evitando que el cultivo antecesor del invierno previo fuera trigo o cebada y protegiendo el cultivo para evitar enfermeda-



**Figura 1.** Líneas de iso rendimiento alcanzable de trigo en función de años de agricultura continua pos pastura sin labranza y condiciones climáticas durante el período crítico de determinación del número de granos por unidad de superficie y el llenado de granos. El Índice de clima fue construido a partir de radiación, temperatura y precipitaciones durante el período crítico de definición del rendimiento (espigazón  $\pm$  15 días) y llenado de grano. Los números internos indican el rendimiento de trigo en Mg ha<sup>-1</sup>. Valores negativos a positivos en el Índice de clima caracterizan primaveras con temperaturas y lluvias superiores a inferiores a la media histórica de las regiones agroclimáticas I y II.



**Figura 2.** Frontera de rendimiento de trigo no limitado por nutrientes (cajas abiertas) o limitado por nutrientes (cajas sombreadas) en función de los años de agricultura continua sin labranza a partir de una pastura perenne. La línea dentro de cada caja representa el rendimiento medio. La función ajustada para producción bajo criterios de fertilización actual (nutriente limitante) es  $Y$  ( $R^2 = 0.69$ ); para ambiente nutrientes no limitantes, para  $AAC \leq 5$ ; para  $AAC > 5$  ( $R^2 = 0.57$ ).

des, malezas y plagas, confirman que el efecto negativo de AAC es independiente de factores bióticos reductores del rendimiento (Figura 2).

Tal efecto negativo mostró dos tramos diferentes: i) durante los primeros 4-5 años pos pastura, se produciría una reducción gradual en el aporte de nutrientes del suelo, que se manifiesta en una reducción gradual del  $Y_{alc}$  cuando se utilizan los actuales criterios de fertilización. Esta tendencia puede ser revertida incrementando la fertilización (no hubo efecto significativo negativo sobre  $Y_{alc}$  bajo la condición "nutriente no limitante"). Esta diferencia se denomina brecha por nutrientes ( $Y_{g \text{ nutrientes}}$ ). Cuando  $ACC > 5$ , se cuantificó una brecha de rendimiento, denominada brecha no directamente atribuible al menor aporte de nutrientes ( $Y_{g \text{ otros}}$ ), que no fue posible controlar por aumento en la fertilización. Esta brecha llegó a ser el 40% de la brecha total ( $Y_{g \text{ T}}$ ) en UP con  $ACC = 10$  (Tabla 1).

La  $Y_{g \text{ T}}$  cuantificada comparando la frontera de rendimiento de trigo sembrado sobre rastrojo

**Tabla 1.** Efecto de los años de agricultura continua sin labranza pos pastura (AAC) sobre la reducción total del rendimiento alcanzable de trigo ( $Y_{g \text{ T}}$ ); la reducción de rendimiento atribuible al suministro de nutrientes ( $Y_{g \text{ nutrientes}}$ ) y atribuible a otros factores ( $Y_{g \text{ otros}}$ ). La fracción de la brecha total ( $RY_{g \text{ T}}$ ) explicada por nutrientes ( $FY_{g \text{ nutrientes}}$ ) u otros factores ( $FY_{g \text{ otros}}$ ) fueron estimada como porcentaje de la  $Y_{g \text{ T}}$ .

AAC	$Y_{g \text{ T}}$	$Y_{g \text{ nutrientes}}$	$Y_{g \text{ otros}}$	$FY_{g \text{ nutrientes}}$	$FY_{g \text{ otros}}$
(años)	Mg ha <sup>-1</sup>			%	%
1	1,47	1,47	0	100	0
5	1,95	1,83	0,12	94	6
10	2,55	1,53	1,02	60	40

**Tabla 2.** Propiedades del suelo (primeros 20 cm) modificadas por los años de agricultura continua sin labranza (AAC): concentración de carbono orgánico del suelo (COS); potencial de mineralización de nitrógeno (PMN); y tasa de infiltración de agua (INF). Los valores corresponden al promedio de: ACC 1 a 3, 4 a 6 y 7 a 10.

ACC	COS mg kg <sup>-1</sup>	PMN mg N-NH4 kg <sup>-1</sup>	INF cm d <sup>-1</sup>
1 a 3 (n = 40)	28 a	30 a	35 a
4 a 6 (n = 20)	28 a	26 ab	30 a
7 a 10 (n = 20)	26 a	18 b	16 b

Números seguidos de distinta letra en la misma columna son significativamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ).

de soja de estación completa (de primera) con  $ACC = 10$  contra el trigo sembrado como cabeza de rotación ( $ACC = 1$ ) fue de 2,5 Mg ha<sup>-1</sup>, de los cuales sólo 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> pueden atribuirse al déficit de nutrientes. Sin tener como referencia el rendimiento de trigo logrado en los primeros años pos pastura, la brecha cuantificada sería sólo de 1,5 Mg ha<sup>-1</sup>, lo cual enmascara el efecto negativo anual que, acumulado en el período, fue de 1,0 Mg ha<sup>-1</sup> adicional.

La primera etapa de degradación correspondería a menor aporte de nitrógeno del suelo, asociado a la reducción cuantificada en el potencial de mineralización de nitrógeno del suelo (PMN). En tanto, en la segunda etapa, cuando  $ACC > 5$ , se sumarían efectos sobre condiciones físicas, cuantificada como una reducción significativa en la tasa de infiltración de agua en el suelo (Tabla 2).

El deterioro en las propiedades físicas y menor aporte de nitrógeno desde el suelo explicarían la interacción entre  $ACC$  y precipitaciones en torno a espigazón y llenado de grano sobre el  $Y_{alc}$  de trigo. El efecto negativo de esquemas de agricultura continua sin labranza sobre la infiltración (Álvarez et al., 2014), la conductividad hidráulica (Aparicio y Costa, 2007) y estabilidad y tipo de estructura de la capa superficial del suelo (Novelli et al., 2013, Sasal et al., 2017) también ha sido cuantificado en la región, pero no su efecto sobre el  $Y_{alc}$  de los cultivos. Tales condiciones, enfrentadas con lluvias excesivas, generarían un ambiente desfavorable para el crecimiento de raíces y favorecerían pérdidas de la ya disminuida capacidad de suministro de nitrógeno.

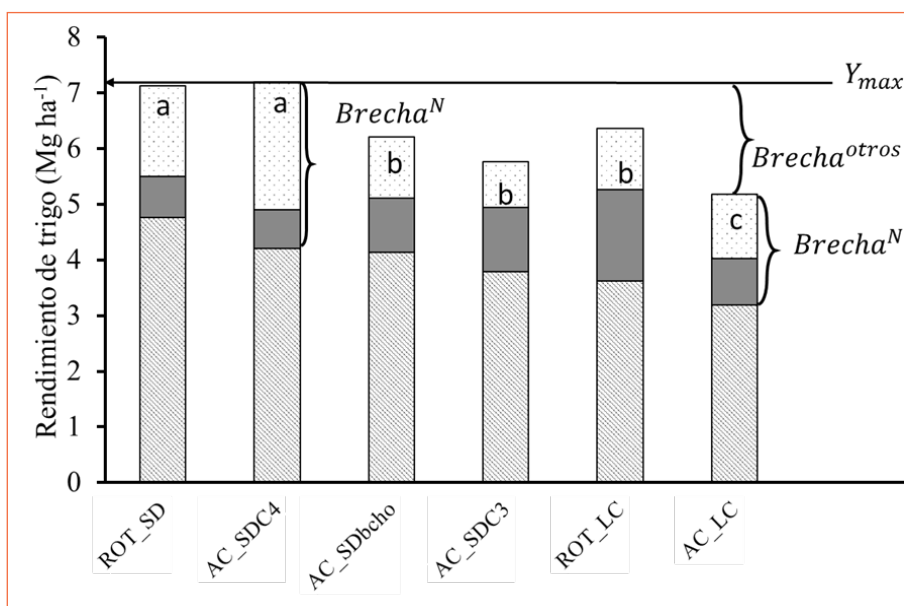
El efecto residual de distintos manejos aplicados sobre un mismo suelo y una misma oferta



de factores que definen el rendimiento implica que el rendimiento potencial ( $Y_p$ ) de las seis alternativas evaluadas en el experimento de largo plazo es el mismo. Sin embargo, el  $Y_{max}$  fue estadísticamente diferente ( $P \leq 0,05$ ) entre ellos, y sólo dos (ROT\_NT y CC\_NT<sub>C4</sub>) lograron un valor cuantitativamente similar (Figura 3).

Como luego de 20 años todos los tratamientos pasaron a ser manejados sin laboreo, lo que se

cuantificó es la respuesta del trigo a suelos con propiedades diferentes, que inicialmente eran iguales, bajo las mismas condiciones de clima. Rotar cultivos-pasturas sin laboreo (ROT\_NT), en una relación 50% del tiempo para cada componente (3,5 años), y uno de los sistemas de agricultura continua, que tuvo alta frecuencia de cultivos con metabolismo C4 (sorgo y maíz) durante el período (C\_SD<sub>C4</sub>), fueron los únicos sistemas que lograron mantener las propiedades del suelo a un nivel capaz de no operar como un factor limitante del rendimiento. Por tanto, un sistema con ACC=20 logró el mismo rendimiento



**Figura 3.** Respuesta a nitrógeno de trigo sembrado sin laboreo después de 20 años (1993-2012) de rotación cultivos-pasturas sin laboreo (ROT\_SD); rotación cultivos-pasturas con laboreo (ROT\_LC); agricultura continua sin laboreo con alta frecuencia de sorgo y maíz (C\_SD<sub>C4</sub>), agricultura continua con barbecho invernal (C\_SD<sub>bcho</sub>); doble cultivo anual con alta frecuencia de soja (AC\_SDC<sub>3</sub>). Distinta letra entre columnas indica diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ).

**Tabla 3.** Propiedades del suelo después de: 20 años de rotación de cultivos con pasturas en siembra directa (ROT\_SD); rotación cultivos pasturas con labranza convencional (ROT\_LC); agricultura continua en siembra directa con alta frecuencia de sorgo y maíz, con alta frecuencia de soja o con alta frecuencia de barbecho invernal (AC\_SD<sub>C4</sub>, AC\_SD<sub>C3</sub>, AC\_SD<sub>bcho</sub>, respectivamente) y agricultura continua con laboreo (AC\_LC). Potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) (0-10 cm), tasa de infiltración de agua (INF) tamaño medio ponderado de agregados estables al agua (AEA-0-10cm).

Sistema de cultivo	ROT_SD	AC_SD <sub>C4</sub>	AC_SD <sub>bcho</sub>	AC_SD <sub>C3</sub>	ROT_LC	AC_LC
PMN mg kg <sup>-1</sup> )	20 b	16 c	16 c	22 b	28 a	17 c
INF (cm h <sup>-1</sup> )	3.1 a	2.5 b	1.8 c	1.7c	2.0 bc	1.3 d
MWD (mm)	2.13 a	1.29 b	1.34 b	2.08 a	1.47 b	0.64 c

Letras distintas dentro de una misma columna indican diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ).

máximo ( $Y_{max}$ ) que uno que estuvo sólo 10 años con agricultura sin laboreo en igual período, rotando con 10 años de pastura (ROT\_NT). La diferencia en el rendimiento entre estos dos sistemas ( $Y_g^T$ ) corresponde 100% a brecha generada por déficit de nitrógeno ( $Y_g^N$ ), lo cual implica mayores necesidades de fertilización nitrogenada en agricultura continua para alcanzar un  $Y_{max}$  similar a la rotación cultivos-pasturas. Los demás sistemas evaluados no lograron mantener la capacidad de producir, generándose una brecha no atribuible directamente a suministro diferencial de nitrógeno ( $Y_g^{otros}$ ), pero sí al efecto que la pérdida de calidad del suelo genera sobre el aporte de nutrientes y su eficiencia de uso.

El PMN y la tasa de infiltración de agua (INF) también estuvieron relacionadas con la brecha de rendimiento atribuida a nitrógeno ( $Y_g^N$ ) y a la no atribuida directamente al suministro de N, a lo que se sumó la estabilidad de los agregados de la capa superficial del suelo (MWD), una variable cuantificada sólo en este experimento (Tabla 3).

Los resultados remarcan que el suministro de nitrógeno del suelo está explicando total ( $AAC \leq 5$ ) o parcialmente ( $ACC > 5$ ) el efecto negativo de los ACC sobre el rendimiento de trigo, y que la cantidad de nitrógeno agregado como fertilizante no está siendo suficiente para compensar el incremento de generado por el proceso de intensificación implementado a nivel productivo. En tanto,  $Y_g^{otros}$  resultaría del efecto que el deterioro de propiedades físicas del suelo tiene sobre: a) la eficiencia de uso de una reducida tasa de aporte de nitrógeno desde el suelo durante todo el ciclo del cultivo, b) el control de la dinámica del agua y el oxígeno en el suelo tanto por exceso como por déficit, y c) la combinación de ambos. En cualquiera de las alternativas, asumiendo que es posible alcanzar un  $Y_{max}$  equivalente al obtenido después de 20 años de ROT\_SD y AC\_SC<sub>C4</sub> y sería necesario fertilizar con más de la dosis máxima evaluada ( $190 \text{ kg ha}^{-1}$  de N). Un sistema de agricultura continua sin laboreo capaz de mantener las propiedades físicas del suelo (en nuestro caso, tasa de infiltración y estabilidad de agregados) a un nivel igual o superior a un "valor crítico", no implica una pérdida de la capacidad de producir del suelo, aunque sí afectaría la eficiencia de uso de los nutrientes cuantificada como  $Y_g^N$ .

## Conclusiones

El proceso de intensificación de la agricultura definido como años de agricultura sin labranza después de la última pastura de la rotación, generó una reducción cuantificable en el rendimiento alcanzable de trigo, en especial, cuando las condiciones climáticas entorno al período crítico de definición del rendimiento del cultivo no fueron favorables.

Tal efecto negativo tiene dos componentes: i) durante los primeros 4-5 años pos pastura, se produciría una reducción gradual en el aporte de nutrientes del suelo, denominado brecha por nutrientes ( $Y_g^{nutrientes}$ ), que puede ser controlado incrementando la fertilización; y ii) cuando  $YCC > 5$ , se cuantificó una brecha de rendimiento, denominada brecha no directamente atribuible directamente al menor aporte de nutrientes ( $Y_g^{otros}$ ), que no fue posible controlar por aumento en la fertilización. Esta brecha llegó a ser el 40% de la brecha total ( $Y_g^T$ ) en chacras con  $AAC = 10$ . Estos períodos se asociaron el primero, a reducción en el aporte potencial de N desde el suelo (PMN) y el segundo a reducción en la tasa de infiltración de agua y estabilidad de agregados del suelo.

Comparado con la rotación cultivos-pasturas sin labranza, el resultado de la agricultura continua sin labranza dependió de la rotación de cultivos. Cuando el sistema de cultivo continuo sin labranza logró mantener las propiedades del suelo relacionadas a la manifestación de  $Y_g^{otros}$ , no implicó pérdida de  $Yalc$  de trigo, pero supone mayores requerimientos de nitrógeno como fertilizante para lograrlo. Este resultado se logró sólo incorporando alta frecuencia de sorgo y maíz en rotación de cultivos.

## Bibliografía

- Abbate P. E., F. H. Andrade y J. P. Culot. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci.* 124, 351-360.
- Álvarez C. R., M. A. Taboada, D. Perelman y J. Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa. Argentina. *Soil Res.* 52, 533-542.
- Álvarez R. y R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83:127 - 141.
- Álvarez R. y Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.* 104, 1-15.

- Aparicio V. y J. L. Costa.** 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 96, 155-165.
- Conceição P. C., J. Dieckow y C. Bayer.** 2013. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. *Soil Till. Res.* 129, 40-47.
- Corsi W.** 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. Centro de investigaciones Agrícolas Dr. Alberto Boerger. Miscelánea no. 40. 28 p.
- Díaz Roselló R.** 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA-Uruguay Inv. Agr.* 1, Tomo I, pp. 103-110.
- Díaz-Zorita M., G. A. Duarte y H. Grove.** 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65, 1-18.
- DIEA.** 2011. Annual Statistics from the Agricultural Sector in Uruguay. DIEA-MGAP. <http://www.mgap.gub.uy>. Last checked marzo 2018.
- Ernst O. y G. Siri-Prieto.** 2009. Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators. *Soil Till. Res.* 105, 260-268.
- FAOSTAT.** 2016. (Food and Agriculture Organization of United Nations Statistics) Agricultural Data: Crops and Livestock Primary and Processed. FAO, Rome. [En línea] Consultado marzo 2010. Disponible en: <http://faostat.fao.org>.
- Fischer R.A.** 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *J. Agric. Sci. Cambridge* 105, 447-461.
- Franzliebbers A. J., J. Sawchik y M. A. Taboada.** 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture and crop rotations in temperate North and South America. *Agric. Ecosyst. & Environ.* 190, 18-26.
- Fuentes M., B. Govaerts, F. De León, C. Hidalgo, L. Dendooven, K. D. Sayre y J. Etchevers.** 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *Eur. J. Agron.* 30, 228-237.
- García-Préchac F., O. Ernst, G. Siri-Prieto y J. Terra.** 2004. Integrating no-till into crop and pasture rotations in Uruguay. *Soil Till. Res.* 77, 1-13.
- Garnett T., M. C. Appleby, A. Balmford, I.J. Bateman, T.G. Benton, P. Bloomer, B. Burlingame, M. Dawkins, L. Dolan y D. Fraser.** 2013. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science*, 341:33 - 34.
- Garnett T., C. Godfray.** 2012. Sustainable intensification in agriculture. Navigating a course through competing food system priorities, Food Climate Research Network and the Oxford Martin Programme on the Future of Food, University of Oxford, UK
- Lobell D.B., K. G. Cassman y C.B. Field.** 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 34, 179-204.
- Mazzilli S, A. Kemanian, O. Ernst, R.B. Jackson, G. Piñeiro.** 2015. Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 85: 22 - 30.
- Mazzilli S, A. Kemanian, O. Ernst, R.B. Jackson, G. Piñeiro.** 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, 75: 273-281.
- Morón A, A. Quincke, J. Molfino, W. Ibáñez y A. García.** 2012. Soil quality assessment of uruguayan agricultural soils. In: Ernst O., Pérez Bidegain M. Terra J., Barbazan M. *Agrociencia Uruguay Special Issue*, 16: 135 - 143.
- Munkholm L.J., R.J. Heck y B. Deen.** 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Till. Res.* 127, 85-91.
- Perdomo C, P. Irisarri y O. Ernst.** 2009. Nitrous oxide emissions from an Uruguayan argiudoll under different tillage and rotation treatments. *Nutr Cycl Agroecosyst* 84:119-128.
- Pittelkow C.M., B.A. Linquist, M.E. Lundy, X. Liang, K.J. van Groenigen, J. Lee, N. van Gestel, J. Six, R.T. Venterea y Ch. van Kessel.** 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crop Research*, 183: 153 - 168.
- Porter P.M., D.R. Huggins, C.A. Perillo, S.R. Quiring y R.K. Crookston.** 2003. Organica and other management strategies with two- and four-year crop rotations in Minnesota. *Agron. J.* 95, 233-244.
- Salvo L, J. Hernández y O., Ernst.** 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*, 109: 116 - 122.
- Sasal M.C., H. Boizard, A.E. Andriulo, M.G. Wilson y J. Léonard.** 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*, 173: 33 - 41.
- Sasal M.C., A.E. Andriulo y M.A. Taboada.** 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87: 9 - 18.
- Studdert G.A., H.E. Echeverría y E.M. Casanovas.** 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 1466-1472.
- Tittonell P.** 2014. Ecological intensification of agriculture- sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8: 53 - 61.
- Wingeyer A B., T. Amado, M. Pérez-Bidegain, G.A. Studdert, C.H. Perdomo Varela, F.O. García y D.L. Karlen.** 2015. Soil Quality Impacts of Current South American. *Sustainability* 7, 2213-2242. ◀

# Efectos de la reposición de nutrientes sobre los rendimientos en la secuencia maíz-trigo/soja

Gudelj V.J.<sup>(1)</sup>; H. Ghío<sup>(2)</sup>; O. Gudelj<sup>(1)</sup>; C. Lorenzon<sup>(1)</sup>; M.B. Conde<sup>(1)</sup>; C. Galarza<sup>(1)</sup>; P. Tamburrini<sup>(3)</sup>; F. García<sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup>EEA. INTA Marcos Juárez, Ruta Provincial N° 12 (2580) Marcos Juárez (Córdoba); <sup>(2)</sup>AAPRESID; <sup>(3)</sup>ASP; <sup>(4)</sup>IPNI CONO SUR; [gudelj.vicente@inta.gob.ar](mailto:gudelj.vicente@inta.gob.ar)

## Introducción

A mediados de la década de 1980 el proceso de agriculturización con excesivo laboreo y falta de secuencias adecuadas de cultivos visibilizaba el deterioro de los suelos, el aumento del proceso erosivo y el mayor enmalezamiento, impactando negativamente sobre la tendencia de rendimiento de los cultivos. Atento a esta problemática, en el año 1986, el INTA implementa el proyecto de agricultura conservacionista (PAC) que tenía como objetivo la difusión de tecnología ya probada en las estaciones experimentales, respecto de reducir el número de labores e implantar los cultivos con mayor cantidad de rastrojo en superficie, hacer un mejor control de las malezas y diagnosticar la necesidad de fertilización de los lotes, todo tendiente a frenar el deterioro de los suelos y hacer un uso más eficiente del agua de lluvia, con la finalidad de estabilizar y mejorar el rendimiento de los cultivos. En el marco del mencionado proyecto se comienza, en 1986 conjuntamente con la Agencia de Extensión del INTA Corral de Bustos, una experiencia de experimentación adaptativa en el área rural de Camilo Aldao. En la misma se comparó durante 16 años la secuencia maíz-trigo/soja-soja en siembra directa (SD) versus esos cultivos implantados en labranza combinada (LC): maíz y soja 1° en labranza vertical, trigo en labranza mínima y soja de 2° en SD. Los resultados mostraron que los cultivos en SD continua presentaron en promedio iguales o mejores rendimientos que los implantados en LC y ambos tratamientos manifestaron una brecha favorable al compararlos con los rendimientos obtenidos en el mismo periodo con los del área maicera típica. En cuanto a las propiedades químicas, el pH se mantuvo en valores del inicio de la experiencia y la materia orgánica decayó considerando los primeros 30 cm de suelo. Este deterioro y el balance negativo de nutrientes estimado, indicaron que el aporte de los mismos vía fertilización resultó insuficiente para las producciones obtenidas, las cuales fueron posibles debido a un eficiente manejo del agua

y a expensas del deterioro químico del suelo.

Dada lo anterior surge la necesidad de contar con información referente a la reposición de nutrientes en agricultura continua bajo SD. Conjuntamente INTA, AAPRESID, ASP e IPNI comienzan en el ciclo 1999-2000 y por un periodo de 18 años, dos experiencias con diferentes opciones de fertilización para la secuencia maíz-trigo/soja en el área de la Agencia de Extensión del INTA Corral de Bustos en el departamento Marcos Juárez, provincia de Córdoba.

El objetivo de las experiencias fue evaluar las características físicas y químicas del suelo y el rendimiento de los cultivos ante distintas opciones de fertilización que incluyeron la reposición de nutrientes cuando se utiliza la secuencia M-T/S implantada en SD. La finalidad del mismo fue encontrar alternativas de fertilización que mejoren la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos. En el presente trabajo se presentan los resultados referidos a las variables rendimiento y eficiencia de uso del agua.

## Materiales y métodos

Desde el ciclo 1999-2000, en el área de la Agencia de Extensión de Corral de Bustos, EEA INTA Marcos Juárez se condujeron dos experiencias con diferentes alternativas de fertilización en la secuencia maíz-trigo/soja con todos los cultivos implantados bajo SD. Los lotes donde se realizaron las experiencias están ubicados en los establecimientos "Don Osvaldo" (DO), (33° 11' 20,09" Lat. S – 61° 58' 49,34" Long. O) y "Los Chañaritos" (LCH), 33° 17' 3,43" Lat. S – 64° 7' 9,08" Long. O) en las zonas rurales de Camilo Aldao y Corral de Bustos, provincia de Córdoba, respectivamente. El clima es templado con 16,5°C de temperatura media anual, sub-húmedo húmedo con un promedio anual de 830 mm, exceso hídrico en primavera y sequía estival; el primero atenúa a la segunda, y los suelos son Argiudoles típicos de la serie Hansen (INTA, 1985). Al inicio de la experiencia, DO tenía una historia agrícola de 31 años de agricultura continua con sólo dos



pasturas en los últimos 100 años, 2,4% de MO y 8 mg.kg<sup>-1</sup> de P extractable (Pe) hasta 18 cm de profundidad. El pH del suelo era 6,1 y 6,2 de 0-5 cm y 5-18 cm de profundidad, respectivamente. Por otro lado, LCH contaba con 12 años de agricultura continua (AC), 3,1% MO y 15 mg.kg<sup>-1</sup> de Pe. El pH del suelo era 6,2 y 6,25 de 0-5 cm y 5-18 cm de profundidad, respectivamente. Es necesario aclarar que LCH, además de la mejor condición inicial de suelo del sitio, presentó napas de agua a escasa profundidad, de donde las raíces de los cultivos pudieron haberse abastecido de agua en periodos secos. En cambio, en el sitio DO las napas estaban a mayor profundidad fuera del alcance de las raíces. Los experimentos se realizaron a campo en franjas contiguas y cada tratamiento tuvo una superficie de 6300 m<sup>2</sup> en DO y 3600 m<sup>2</sup> en LCH. Los tratamientos que se evaluaron fueron los siguientes: 1) testigo sin fertilizar (T); 2) azufre (S); 3) nitrógeno (N); 4) nitrógeno + fósforo (NP); 5) nitrógeno + fósforo + azufre (NPS) (para estos tratamientos se utilizó la dosis que utiliza el productor medio de la zona que en promedio fue de 80 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 17 kg.ha<sup>-1</sup> de P y 15 kg.ha<sup>-1</sup> de S, para maíz, y 80 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 21 kg.ha<sup>-1</sup> de P y 14 kg.ha<sup>-1</sup> de S, para trigo/soja); 6) nitrógeno + fósforo + azufre de reposición (NPSr) (se reponen el nitrógeno, fósforo y azufre que se llevan los granos con la cosecha) y 7) NPSr + micronutrientes (NPSrm) (igual al tratamiento 6, más reposición de zinc y boro). La determinación de la dosis de reposición se realizó en función de un rendimiento objetivo definido para cada cultivo y de los requerimientos por tonelada de grano de cada uno de ellos, utilizando el valor referenciado por el Instituto Internacional de Nu-

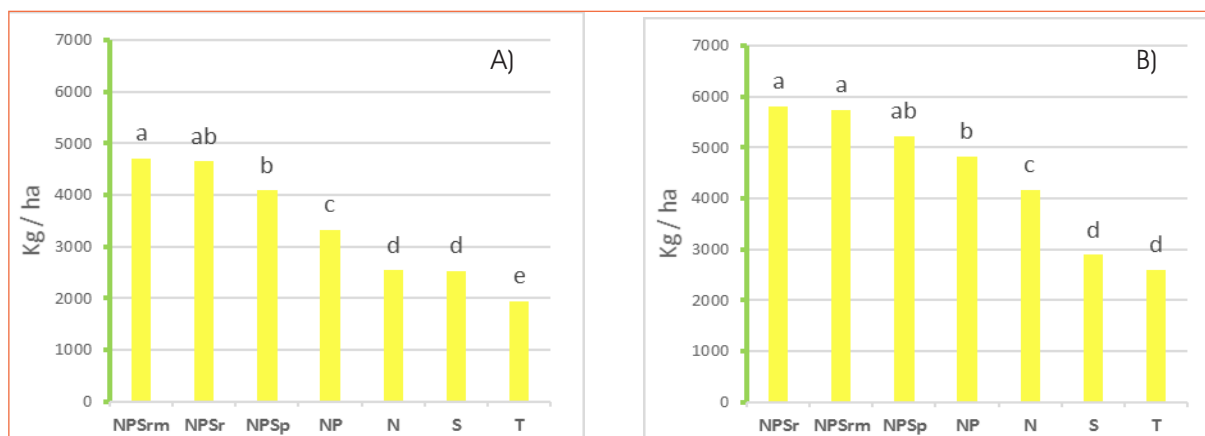
trición de Plantas (García & Correndo, 2016). Se consideró que un 60% del N de la soja proviene de la fijación biológica, según lo evaluado por Salvagiotti et al. (2015). Para la determinación de rendimientos de los cultivos se cosechó toda la parcela. El estudio comprendió el periodo 1999-2016/7 y se invalidó la comparación entre sitios, dado que cuando en uno de ellos se implanta maíz en el otro se implanta trigo/soja, y viceversa. Se determinó la eficiencia de uso del agua de los cultivos a partir de los promedios de rendimientos y de precipitaciones durante el ciclo de los mismos entre 1999 y 2013.

Para el análisis de los resultados se utilizaron Modelos Lineales Mixtos, considerando a los años como efectos aleatorios y los tratamientos como fijos. Se compararon las medias con el test LSD de Fisher (5%).

Finalmente, se hizo una comparación de los promedios de los rendimientos de NPSr (1999-2015) con los obtenidos en promedio en el Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms. Jz.), en base a datos de MINAGRI (Ghida Daza, INTA Marcos Juárez, com. per.), y con los obtenidos en promedio por productores con suelo de capacidad de uso I y II sin limitaciones y con 50% de la superficie con napas cercanas, que utilizan la secuencia maíz-trigo/soja-soja en SD en base a información de grupos CREA Monte Buey-Inrville, Provincia de Córdoba (Peretti & Cottura, INTA Marcos Juárez-CREA, com. pers.).

## Resultados y discusión

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran los rendimientos de los cultivos en cada ciclo evaluado. En el sitio LCH con menor historia agrícola previa,



**Figura 1.** Rendimiento promedio del cultivo de trigo A): Don Osvaldo y B): Los Chañaritos, periodo 1999/2000-2016/2017. T: testigo sin fertilizar; S: azufre; N: nitrógeno; NP: N+ fósforo; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Ídem NPSr + reposición de micronutrientes.

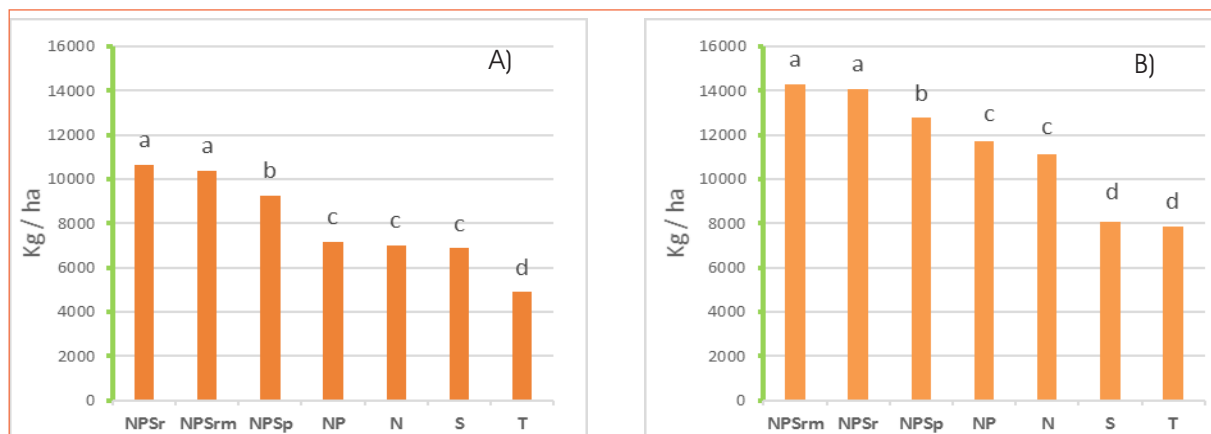
los cultivos expresaron un mayor potencial de rendimiento debido a una mejor condición del suelo y también a la cercanía de la napa que pudo haber morigerado el déficit hídrico en años con menores precipitaciones.

Para el cultivo de trigo en DO (Figura 1A), hubo respuesta a NPS utilizados individualmente y una potenciación del rendimiento cuando estos nutrientes se aplicaron en forma conjunta. Los tratamientos S y N tuvieron un plus de rendimiento del 30% y 30,3%, respectivamente, en relación con el T. El tratamiento NP tuvo un 31% más de rendimiento que N, evidenciando la respuesta a P. Cuando se utilizaron los tres nutrientes en forma conjunta se potenció el rendimiento superando el de NP en un 23%. La fertilización de reposición con NPS no mejoró el rendimiento de la dosis de NPS utilizada por el productor, excepto cuando, además, a la dosis de reposición se le agregó micronutrientes, superando NPSrm en 15,2% a NPS. De todos modos, no podemos decir que hubo respuesta a la aplicación de micronutrientes dado que NPSr y NPSrm tuvieron un rendimiento muy similar sin diferencias significativas entre ellos.

En LCH (Figura 1B), hubo respuesta a N y P, pero no a S. Se obtuvo un incremento del 60% y 15,8% en los rendimientos al comparar N con T y NP con N, respectivamente. La dosis de S aplicada individualmente no superó al testigo y la dosis de NPS no superó a la de NP. Tampoco hubo mayor rendimiento cuando se utilizó la dosis de reposición sola o combinada con micronutrientes. La historia previa del lote con menos años de agricultura, mayor cantidad de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes podría explicar esta menor respuesta a la fertilización.

Para el cultivo de maíz en DO (Figura 2 A), hubo respuesta a la aplicación de azufre y nitrógeno: los tratamientos S y N tuvieron un plus de rendimiento del 41% y 43,7%, respectivamente, en relación con el T. A pesar de que el lote estudiado contaba con bajo contenido de P en su caracterización inicial, cuando se comparó N con NP no se apreció mayor diferencia por el agregado de P, pero se produjo un sinergismo cuando se utilizaron los tres nutrientes conjuntamente: el tratamiento NPS superó en un 29,2% a NP. Lo anterior marca la importancia de fertilizar con todos los nutrientes que se diagnostiquen como deficientes. Con los tratamientos de reposición, NPSr y NPSrm, se obtuvieron los mejores rendimientos superando en un 15% y un 12%, respectivamente, a NPS. No hubo respuesta a la aplicación de micronutrientes consiguiéndose con NPSr un rendimiento similar a NPSrm.

Para maíz en LCH (Figura 2B), al comparar los tratamientos S y T, no se observó respuesta a la aplicación de azufre quizás debido al mayor contenido inicial de MO de este lote. Sí se pudo comprobar respuesta por la aplicación de N, con la cual se logró superar en un 38,1% al testigo sin fertilizar; respuesta a P, el tratamiento NP aumentó el rendimiento un 5,3% respecto de N; en tanto que el S cobró importancia cuando se agregó al tratamiento NP, dado que NPS mejoró el rendimiento en un 10,9% respecto de NP. Los mejores rendimientos se obtuvieron con los tratamientos NPSr y NPSrm que superaron en un 10,4% y 11,9%, respectivamente, al tratamiento NPS. No fue significativo el incremento de rendimientos por la aplicación de micronutrientes. Los valores



**Figura 2.** Rendimiento promedio del cultivo de maíz A): Don Osvaldo y B): Los Chañaritos, período 1999/2000-2016/2017. T: testigo sin fertilizar; S: azufre; N: nitrógeno; NP: N+ fósforo; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Ídem NPSr + reposición de micronutrientes.

de boro y zinc, por encima del nivel crítico al final de la experiencia, podrían explicar la ausencia de respuesta a estos nutrientes.

En soja DO (Figura 3A), la única respuesta que se observa es por la aplicación de azufre, obteniéndose un plus de rendimiento del 36,3% al comparar S con T. No existen diferencias en los tratamientos que incluyen azufre entre los nutrientes aplicados. Se manifestó una marcada limitación de azufre disponible en el sistema, el trigo utilizó el poco, azufre disponible, induciendo a una mayor deficiencia de este nutriente, que se acentuó cuando sólo se fertilizó con nitrógeno.

En LCH (Figura 3B), las diferencias de rendimientos entre tratamientos fertilizados respecto del testigo sin fertilizar no son significativas excepto cuando se compara el testigo con los tratamientos NPSrm o NPSp, aunque no se manifiestan diferencias entre estos y NPSr, S o NP. No es muy clara la respuesta. Todo indica que, al ser un lote con menos años de agricultura, más rico en MO, y con mayor posibilidad de ofrecer azufre

disponible permite que no sea aún deficitario este nutriente para el cultivo. Se observó una depresión del rendimiento cuando solo se fertiliza con N pudiendo suponer el efecto negativo sobre la fijación biológica de este nutriente cuando no se aplica conjuntamente con azufre o fósforo o fósforo + azufre.

En ambos sitios, la falta de respuesta a la aplicación de micronutrientes en soja, NPSr versus NPSrm, se podría explicar porque los valores de los mismos en el suelo; al final de la experiencia, estuvieron por encima de los considerados críticos 0,6 mg.kg<sup>-1</sup> para boro (Reussi Calvo, Unidad Integrada Balcarce EEA INTA-FCA UNMP, comunicación personal) y 1 mg.kg<sup>-1</sup> para zinc (Barbieri et al., 2015).

En las Figuras 4 a 9 es posible apreciar el rendimiento relativo de los tratamientos NPS, NPSr y NPSrm respecto del tratamiento T, para cada año y cultivo en ambas experiencias e identificar los años en que los tratamientos NPSr y NPSrm no se diferenciaron del tratamiento NPS.

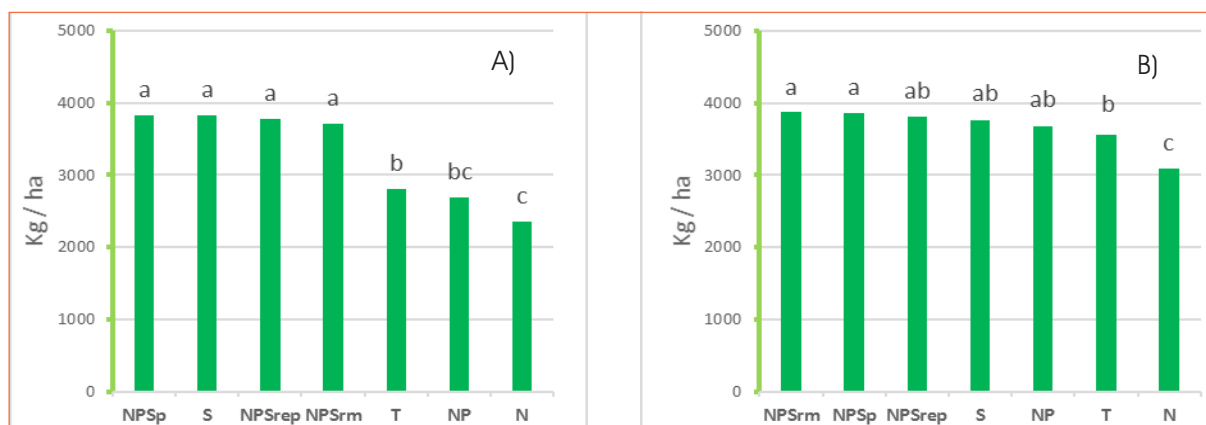


Figura 3. Rendimiento promedio del cultivo de soja A): Don Osvaldo y B): Los Chañaritos, periodo 1999/2000-2016/2017. T: testigo sin fertilizar; S: azufre; N: nitrógeno; NP: N+ fósforo; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Ídem NPSr + reposición de micronutrientes.

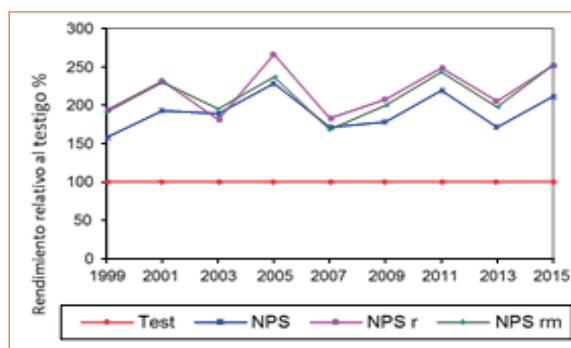


Figura 4. Maíz DO Evolución de los rendimientos relativos

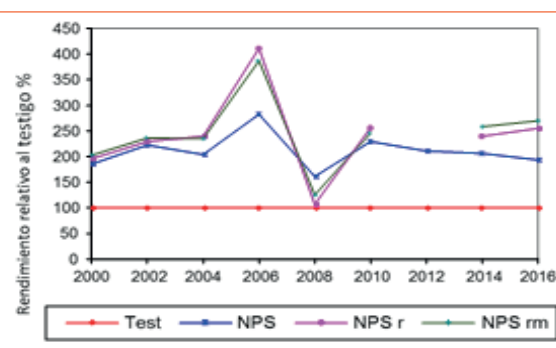
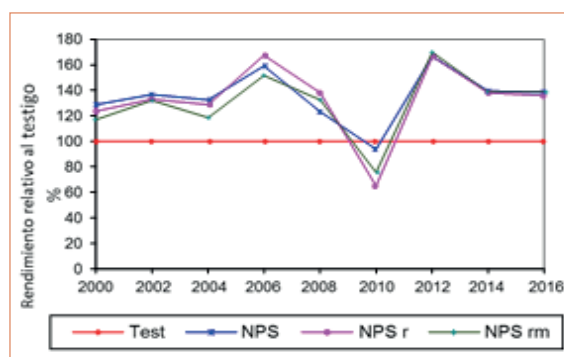


Figura 5. Trigo DO Evolución de los rendimientos relativos

En el sitio DO, para los cultivos gramíneas, el rendimiento de los tratamientos de reposición superó al del tratamiento NPS, excepto en dos años en maíz y uno en trigo, en que por bajas precipitaciones los rendimientos se igualaron (Figuras 4 y 5); e incluso en el trigo de 2008 el rendimiento de reposición cayó por debajo de NPS dado que desde mayo a setiembre no hubo precipitaciones, siendo el total de las mismas en el ciclo del cultivo un 35% menor que las históricas, por lo que el rendimiento máximo del cultivo estuvo por debajo de los 2000 kg.ha<sup>-1</sup> (Figura 5).

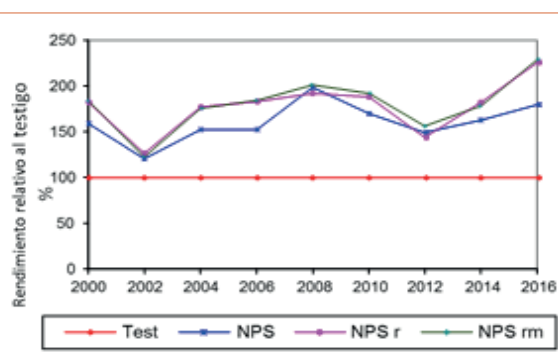
Es necesario aclarar que en el ciclo 2012 por problemas de comercialización el productor decidió no implantar trigo, e implantó cebada, y los tratamientos de reposición no se pudieron cosechar dado el vuelco total que sufrieron (Figura 5).



**Figura 6.** Soja DO Evolución de los rendimientos relativos

En el cultivo de soja sólo se reflejó respuesta a la aplicación de S sin mayores diferencias entre los tratamientos fertilizados con este nutriente, cuyos rendimientos en 2010 cayeron por debajo del testigo debido a que las precipitaciones durante el ciclo de la soja fueron el 58% del promedio histórico, por lo que el tratamiento testigo al tener un antecesor con menor rendimiento quizás se haya beneficiado con una mayor reserva de agua inicial (Figura 6).

En el sitio LCH (Figuras 7, 8 y 9) para los cultivos gramíneas, el rendimiento de los tratamientos de reposición superó al tratamiento NPS, excepto en algunos años en los que por déficit hídrico (dos años en maíz, déficit en periodo crítico, y dos en trigo; déficit en periodo crítico y llenado de grano) y exceso de precipitaciones (un año en maíz), los rendimientos se igualaron e incluso



**Figura 7.** Maíz LCH Evolución de los rendimientos relativos

**Tabla 1.** Eficiencia de uso del agua en el sitio Don Osvaldo, periodo 1999-2013. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Ídem NPSr + reposición de micronutrientes.

Tratamiento	T	NPS	NPSr	NPSrm
Cultivo	kg de grano. mm <sup>-1</sup> de agua disponible			
MAIZ	9,6	17,5	19,7	19,3
TRIGO	8,2	17,6	19,8	19,8
SOJA	6,2	8,3	8,0	7,9

**Tabla 2.** Análisis comparativo de rendimiento promedio NPSr Don Osvaldo vs. promedio del Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms. Jz.), periodo 1999/2000-2015/16. NPSr: N+P+S dosis de reposición.

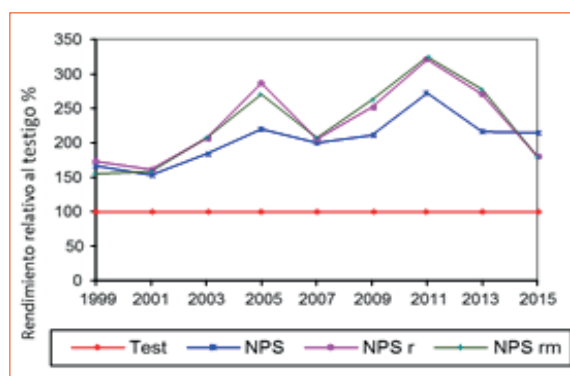
SITIO	RENDIMIENTOS (kg/ha)		
	MAIZ	TRIGO	SOJA
NPSr Don Osvaldo	10662	4495	3838
Dto. Ms. Jz.	9102	3020	3468
Relación NPSr/Dto. Ms. Jz.	117	149	111



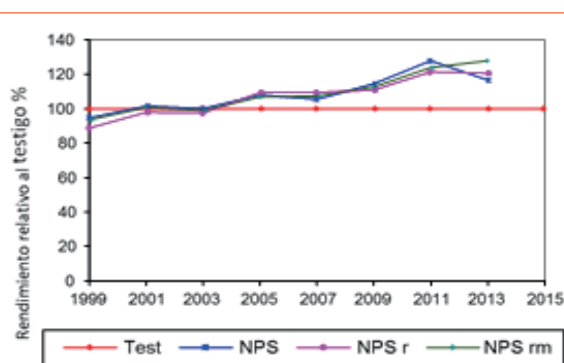
en el año 2015, en trigo, cayeron por debajo del logrado por NPS al ser más afectados por roya del tallo (**Figuras 7 y 8**). Para el cultivo de soja, se observa que no hubo mayores diferencias entre los tratamientos de reposición y NPS. Todos los tratamientos se diferenciaron del T en forma creciente en el transcurso de la experiencia, que se explicaría por el déficit de S que se acentúa con el paso del tiempo en el tratamiento sin fertilizar con este nutriente. En 2015 la soja no se cosechó dado que, por ascenso de la napa freática, el experimento estuvo bajo agua durante una gran parte del ciclo y se terminó perdiendo el cultivo (**Figura 9**).

En síntesis, en la mayoría de los años se obtuvieron mejores rendimientos en los cultivos

gramíneas cuando se utilizaron las dosis NPSr y NPSrm. En los años donde esto no ocurrió, en casi todas las situaciones, el déficit hídrico, fundamentalmente en periodos críticos de los cultivos, explicaría ese diferente comportamiento. Los pronósticos climáticos podrían ayudar a definir cuándo sería necesario reducir las dosis de reposición y cuándo utilizarlas para disminuir las brechas de rendimientos. Considerando los rendimientos potenciales de secano, en la región en estudio, 12000, 5300 y 4400 kg.ha<sup>-1</sup> para maíz, trigo y soja, respectivamente (Aramburu Merlos et al., 2016), en el sitio DO, sin napas cercanas, se consiguió el 77% y 88% en trigo; el 87% y 86 % en soja y el 77% y 89% en maíz para las dosis NPS y NPSr, respectivamente, del potencial referido.



**Figura 8.** Trigo LCH Evolución de los rendimientos relativos



**Figura 9.** Soja LCH Evolución de los rendimientos relativos

**Tabla 3.** Análisis comparativo de rendimiento promedio NPSr en el sitio Los Chañaritos vs. promedio del Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms. Jz.), periodo 1999/2000-2015/16. NPSr: N+P+S dosis de reposición.

SITIO	RENDIMIENTOS (kg/ha)		
	MAIZ	TRIGO	SOJA
LOS CHAÑARITOS NPSr	14068	5805	3813
Dto. Ms. Jz.	9489	3063	3241
Relación NPSr/Dto. Ms. Jz.	148	190	1,18

**Tabla 4.** Análisis comparativo de rendimiento promedio NPSr promedio de los sitios Don Osvaldo-Los Chañaritos vs. productores Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms. Jz.) sin limitantes, periodo 1999/2000-2015/16. NPSr: N+P+S dosis de reposición.

SITIO	RENDIMIENTOS (kg/ha)		
	MAIZ	TRIGO	SOJA
PROMEDIO DON OSVALDO-LOS CHAÑARITOS NPSr	12365	5150	3825
PRODUCTORES SUELOS CI-C2 Sin limitantes, 50 % con napas cercana. Dto. Ms. Jz.	10289	3884	3235
Relación NPSr/Ms. Jz.	120	133	1,18

En el sitio LCH, con napa cercana, el tratamiento NPS logró el 99%, 88% y 107% del potencial en secano para trigo, soja y maíz, respectivamente. Con reposición de nutrientes se consiguió un 87% del potencial en soja, mientras que en trigo y maíz se superó el potencial en un 10% y 17%, respectivamente, lo que indica la mayor importancia de aumentar las dosis de fertilización en ambientes donde la napa de algún modo asegura la provisión de agua para estos cultivos.

### Efecto sobre la eficiencia de uso del agua

En la **Tabla 1**, se presenta la estimación de la eficiencia de uso del agua de cada cultivo para los tratamientos contrastantes de DO, a partir del promedio de rendimientos y precipitaciones durante el ciclo de los cultivos desde 1999 a 2013.

Se puede observar una mayor eficiencia en los tratamientos de reposición para los cultivos gramíneas a partir de los mejores rendimientos obtenidos con la misma disponibilidad de agua durante el ciclo. Para soja, la diferencia se dio sólo entre los tratamientos fertilizados y el testigo sin fertilizar, dado que la única respuesta a la fertilización es por la aplicación de azufre. Obsérvese la mejor eficiencia de los cultivos de gramíneas respecto de la leguminosa, principalmente cuando se fertilizó.

### Análisis comparativos de rendimientos

En la **Tabla 2** se presentan para el sitio DO y en la **Tabla 3** para el sitio LCH, los promedios de rendimiento (1999-2015) de maíz, trigo y soja obtenidos en el tratamiento NPSr comparado con el promedio de cada cultivo obtenido en el mismo periodo en el Dto. Ms. Jz.; y en la **Tabla 4**, se presenta el rendimiento de maíz, trigo y soja del tratamiento NPSr promedio de los sitios DO y LCH, comparado con los promedios obtenidos por los productores con suelo clase I y II sin limitaciones y con un 50% de la superficie con napas cercanas.

En la experiencia DO se obtuvo un 17%, 49% y 11% más de maíz, trigo y soja, respectivamente, que el promedio del Dto. Ms. Jz. (**Tabla 2**). Cuando la comparación se hace con los datos del sitio LCH, esas diferencias se ampliaron para maíz y trigo (48%, 90%, y 18% respectivamente) (**Tabla 3**). También es válido aclarar que el promedio del Dto. Ms. Jz. incluye soja de primera y de se-

gunda mientras que en los experimentos siempre fue soja de segunda. La comparación con los promedios obtenidos por los productores con suelos clase I y II sin limitaciones y con 50% de la superficie con napas cercanas, muestra que el tratamiento NPSr tiene un plus de rendimiento del 20%, 33% y 18% para maíz, trigo y soja, respectivamente (**Tabla 4**). Lo anterior sugiere que existe una parte importante de la brecha de rendimientos que se podría disminuir mejorando el manejo de la fertilización.

### Consideraciones finales

En maíz, los mejores rendimientos se alcanzaron cuando se utilizó la fertilización de reposición. En trigo eso solo ocurrió en el sitio con mayor historia agrícola. Con este tratamiento en el sitio con mayor historia agrícola y sin napas cercanas, se alcanzó un 88% y 89% de los rendimientos potenciales de secano en la región de estudio para trigo y maíz, respectivamente. En el sitio con menor historia agrícola y napas cercanas se superó dicho potencial en 10% y 17% para trigo y maíz, respectivamente, lo que puso de manifiesto la mayor importancia de aumentar las dosis de fertilización en este tipo de ambientes. En soja, los mejores rendimientos se lograron cuando se fertilizó con S o con S combinado con otros nutrientes.

Los resultados mostraron que, si se dejara de fertilizar, en lotes con muchos años de agricultura continúa, los rendimientos de trigo y maíz se reducirían un 50% y los de soja un 27% aproximadamente.

En el periodo analizado no hubo una incidencia importante por la aplicación de micronutrientes en los rendimientos promedios obtenidos. No obstante, hubo un plus de rendimiento cuando se aplicaron micronutrientes en algunos de los últimos ciclos evaluados, lo que sugiere que posiblemente de aquí en adelante los mismos cobren mayor importancia en la definición de los rendimientos.

Los tratamientos de reposición, en el sitio con mayor historia agrícola y sin napas cercanas, respecto de NPS, mejoraron en un 11,4% la eficiencia de uso del agua en trigo y maíz, mientras que para el cultivo de soja esa mejora fue del 28% al comparar con el tratamiento T

De acuerdo al análisis comparativo de rendimiento respecto del promedio del departamento Marcos Juárez o el de productores con suelos sin

limitantes, el de trigo principalmente y también el de maíz aparecen como los cultivos donde más efecto tendría aumentar la dosis de fertilización, con la finalidad de disminuir la brecha de rendimiento posible de alcanzar.

## Bibliografía

- Aramburu Merlos, F; J Monzon; F Andrade & P Grassini.** 2016. Rendimientos potenciales y brechas de rendimientos en Argentina. XXIV Congreso Nacional de Siembra Directa. Aapresid. Rosario-Santa Fe.
- Barbieri, PA; HR Sainz Rozas; HE Echeverría; F Salvagiotti; P Barbagelata; M Barraco; JC Colazo; G Ferraris; HS Sánchez; RH Cáceres Díaz; NI Reussi Calvo; G Esposito; M Eyherabide & B Larsen.** 2015. ¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de zinc en el cultivo de maíz? IPNI, Información Agronómica de Hispanoamérica N°19.
- Echeverría, H.E; HR Sainz Rozas & PA Barbieri.** 2014. Maíz y sorgo. Pp 435-478. En HE Echeverría y FO García (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- García, FO & AA Correndo.** 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
- Gil, R.** 2015. El uso del agua en una agricultura sustentable. En Capítulo 3: El agua en la producción agropecuaria. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Tomo I. 1ª ed. – Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación Ciencia, Educación y Cultura. FECIC.
- Gudelj, V; C Galarza; G Espoturno; P Vallone; O Gudelj; B Masiero & H Ghio.** 2002. 16 años de Experiencias de fertilización en SD. Actas del X Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario-Santa Fe.
- Ghida Daza, C.** 2016 INTA Marcos Juárez, com. per
- INTA.** 1986. Síntesis de la versión técnica del proyecto de "Agricultura Permanente: Desarrollo y difusión de tecnologías conservacionistas".
- INTA.** 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Pergamino (3360-32). 106 pp. + anexos.
- Lattanzi, AR.** 1989. Secuencias de cultivos y sistemas de labranzas conservacionistas para la producción de soja. IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Actas tomo IV. Buenos Aires, Argentina.
- Lattanzi, A; J Arce; HJ Marelli; C Lorenzon & T Baigorría.** 2005. Efecto de largo plazo de la SD y de rotaciones de cultivos sobre los rendimientos, el carbono y nitrógeno orgánico en un suelo Argiudol típico en Marcos Juárez. En CD y actas de Seminario internacional: Indicadores de Calidad de suelo. Marcos Juárez - Córdoba-Argentina.
- Marelli, HJ & JM Arce.** 1989. Siembra directa de soja sobre trigo. IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Actas tomo II. Buenos Aires, Argentina.
- Peretti, Miguel & Cottura, Gabriel.** 2016. INTA Marcos Juárez-CREA Inrville-Monte buey, com. pers."
- Reussi Calvo N.** 2016. Unidad Integrada Balcarce EEA INTA-FCA UNMP, comunicación personal.
- Salvagiotti, F; DJ Collino; A Peticari; C Piccinetti; G Ovando; S Urquiaga & RW Racca.** 2015. El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 20-diciembre - Versión Cono Sur. ◀

## Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe: 18 años de ensayos en lotes de producción

Gelso Paula<sup>1</sup>, Franco Permingeat<sup>1</sup>, Ricardo Pozzi<sup>1</sup>, Santiago Gallo<sup>1</sup>, Matías Salinas<sup>2</sup>, Nahuel Reussi Calvo<sup>3</sup> y Fernando O. García<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Región CREA Sur de Santa Fe; <sup>2</sup> Nutrien Ag Solutions; <sup>3</sup> CONICET-Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce, Fertilab; <sup>4</sup> Consultor privado, Unidad Integrada INTA-FCA Balcarce (anteriormente IPNI Cono Sur) [mgelso@crea.org.ar](mailto:mgelso@crea.org.ar)

En 1999, la Región CREA Sur de Santa Fe planteó la necesidad de generar información local en cuanto a nutrición de cultivos y fertilidad de suelos. Fundamentalmente, en ese momento se evaluaba el manejo adecuado de nitrógeno (N) y fósforo (P) y la posible deficiencia y respuesta a la aplicación de azufre (S). En colaboración con el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI) Cono Sur y el apoyo de Nutrien Ag Solutions (anteriormente ASP), a partir de la campaña 2000/01, se estableció una red de ensayos en lotes de producción en zonas representativas de los ecosistemas de la región, cuyos objetivos iniciales fueron los siguientes:

1. Determinar respuestas (directas y residuales) de los cultivos dentro de la rotación a la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S) en diferentes ambientes de la región
2. Evaluar algunas metodologías de diagnóstico de la fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada
3. Evaluar deficiencias y respuestas potenciales a otros nutrientes: potasio (K), magnesio (Mg), boro (B), cobre (Cu) y zinc (Zn)

A partir de la información que se fue generando y el planteo de nuevos interrogantes, se fueron sumando otros objetivos:

4. Evaluar los rendimientos alcanzables sin limitaciones nutricionales
5. Conocer la evolución de los suelos bajo distintos esquemas de fertilización determinando índices relacionados con su calidad química, biológica y física
6. Evaluar el impacto económico de la fertilización NPS.

Los ensayos se establecieron inicialmente en 11 lotes de producción en rotación maíz-trigo/soja (M-T/S) o en rotación maíz-soja de primera-trigo/soja (M-S-T/S). Actualmente, Abril 2019, se continúan evaluando cinco sitios: dos en rotación M-T/S y tres en rotación M-S-T/S.

Información actualizada de los resultados obtenidos a lo largo de los 18 años de la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe se puede encontrar en García et al. (2010) y en los sitios de Internet <http://www.aacrea.org.ar> y <http://Lacs.ipni.net>. A lo largo de los primeros 18 años, se realizaron presentaciones en distintos eventos, se publicaron numerosos artículos técnicos, se realizaron tesis de grado y posgrado y se publicaron 6 artículos en revistas científicas.

### Principales resultados

1. La fertilización NPS incrementó los rendimientos de maíz en 42-124%, los de soja de primera en 2-32%, los de trigo en 11-191% y los de soja de segunda en 8-54%, según la condición inicial de fertilidad de cada sitio. La fertilización NPS redujo la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos.
2. Las Figuras 1 y 2 muestran los rendimientos promedio de los seis tratamientos evaluados para los ensayos en rotación M-S-T/S y M-T/S en estos primeros 18 años.
3. La eficiencia agronómica de uso del N fue de 13 a 31 kg de maíz por kg de N y de 2 a 17 kg de trigo por kg de N. En el caso de P, la eficiencia de uso fue de 29-60, 11-60 y 1-24 kg de grano por kg de P en maíz, trigo y soja, respectivamente. Para S, la eficiencia de uso fue de 22-130, 0-42 y 4-33 kg de grano por kg de S en maíz, trigo y soja, respectivamente
4. La respuesta a otros nutrientes que no fueran NPS, presentó una frecuencia del 16-17% en maíz y trigo y del 1% en soja. Otros nutrientes incrementaron los rendimientos, sobre NPS, un 2% en maíz, 1% en soja de primera, 8% en trigo y 3% en soja de segunda.
5. Se calibraron y/o validaron metodologías de diagnóstico para N en maíz y trigo, y para P en todos los cultivos.
6. Se cuantificaron los cambios en P extractable



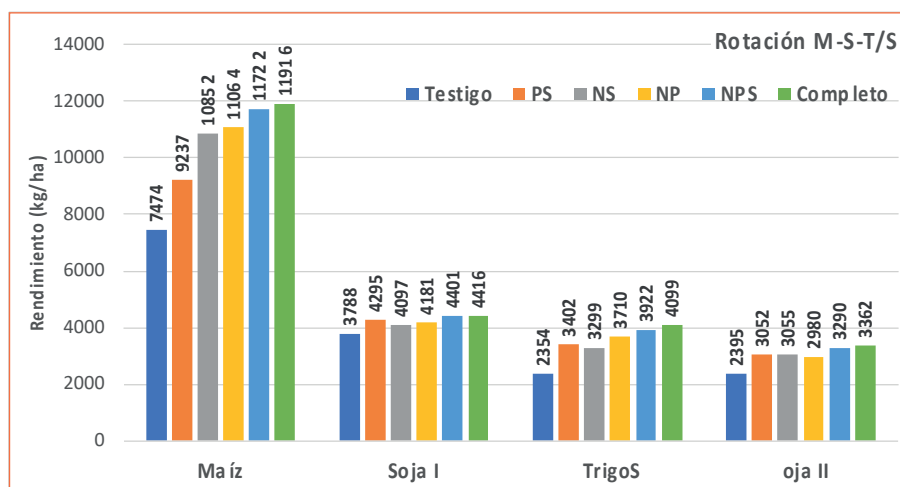
(Bray) del suelo según los balances de P de los cultivos (diferencias entre aplicación vía fertilización y remoción vía granos).

7. La fertilización NPS mejoró la eficiencia de uso del agua entre 22% y 103% según cultivo y sitio experimental.
8. La fertilización NPS incrementó el margen bruto entre 80 a 370 U\$ por ha y por año según sitio experimental.
9. Los efectos de la fertilización NPS, en comparación con el tratamiento Testigo, se verificaron en un incremento de 7% en la cantidad de C orgánico (promedio de cinco sitios), y de 23%

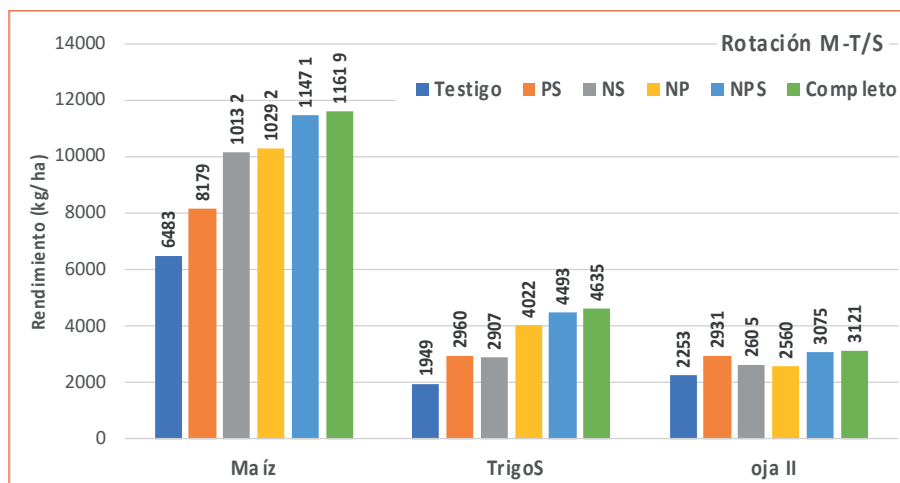
de la concentración de glomalina y 50% de la actividad microbiana (datos de un sitio). Sin embargo, la fertilización NPS aumentó la acidez del suelo con disminuciones del 8% en promedio para cinco sitios. Futuros trabajos deberían evaluar con mayor detalle los efectos de la fertilización sobre las propiedades del suelo.

En síntesis, la Red de Nutrición, a través del trabajo en equipo de productores, asesores, e investigadores de CREA Sur de Santa Fe, IPNI Cono Sur y Nutrien Ag Solutions, así como también de instituciones como la Facultad de Ciencias

Agrarias (Universidad Nacional de Rosario), la Facultad de Agronomía (Universidad de Buenos Aires) y el Centro de Investigaciones Agropecuarias (CIAP) de INTA, ha contribuido a evaluar y comprender los efectos de prácticas de manejo como la fertilización en la sustentabilidad agronómica, económica y ambiental de los sistemas de producción de cultivos de grano de la región pampeana central de Argentina. ◀

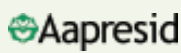


**Figura 1.** Rendimientos promedio para los seis tratamientos evaluados en los ensayos de la rotación maíz-soja-trigo/soja. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2017/18 inclusive. Fuente: CREA Sur de Santa Fe-Nutrien Ag Solutions-IPNI.



**Figura 2.** Rendimientos promedio para los seis tratamientos evaluados en los ensayos de la rotación maíz-trigo/soja. Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe. Campañas 2000/01 a 2017/18 inclusive. Fuente: CREA Sur de Santa Fe-Nutrien Ag Solutions-IPNI.

## AUSPICIAN:



## PATROCINAN:



## Fertilizar Asociación Civil

Bartolomé Mitre 1332 Piso 4  
(C1036AAZ) Ciudad Autónoma, Buenos Aires  
+54 011 4382 2413 - [simposio@fertilizar.org.ar](mailto:simposio@fertilizar.org.ar)

web [fertilizar.org.ar](http://fertilizar.org.ar)

Twitter @FertilizarAC

Facebook Fertilizar Asociación Civil

YouTube Fertilizar Asociación Civil